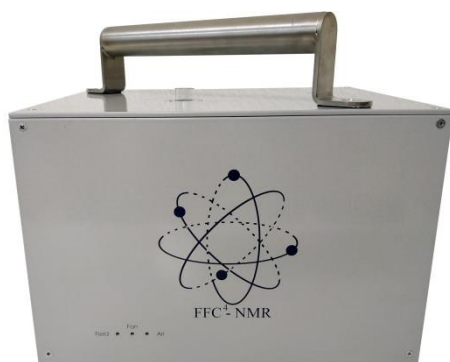


ANDRÉ FILIPE  
FERREIRA ALVES  
FERNANDES

**MAGNETO PARA RESSONÂNCIA  
MAGNÉTICA NUCLEAR DE CAMPO  
CÍCLICO RÁPIDO**  
(Caracterização e otimização da  
configuração)



Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Eletrotécnica e Computadores**, realizada sob a orientação do Professor António Eusébio Velho Roque e coorientação do Professor Duarte de Mesquita e Sousa

**Júri**

*Presidente:* Doutor José Henrique Querido  
Maia – ESTSetúbal/IPS

*Orientador:* Doutor António Eusébio Velho  
Roque – ESTSetúbal/IPS

*Arguente:* Doutor Elmano da Fonseca

Junho 2020



*À minha família.*





# Resumo

A Ressonância Magnética Nuclear é uma técnica espectroscópica utilizada em diversas áreas, podendo ser utilizada para auxiliar a caracterização de substâncias e fazer o controle de qualidade de produtos, entre outras aplicações. Uma das técnicas utilizadas é designada por Ressonância Magnética Nuclear de Campo Cíclico Rápido. Esta técnica tem especificações que tornam os equipamentos, para a realização de ensaios, complexos. Este trabalho tem como principais objetivos o projeto de montagem das componentes mecânicas e térmicas de um magneto de Ressonância Magnética Nuclear de Campo Cíclico Rápido e a caracterização eletromagnética do mesmo, com a ambição de tornar o protótipo industrializável. Para tal, são feitas simulações recorrendo a aplicações computacionais baseadas no método dos elementos finitos, complementadas com ensaios laboratoriais.

**Palavras-chave:** Ressonância Magnética Nuclear (RMN), Campo Cíclico Rápido (CCR), Efeito de Franja, Eletromagneto, Magneto, Projeto.

# Abstract

Nuclear Magnetic Resonance is a spectroscopic technique used in several areas, which can be used to assist in the characterization of substances and to make product quality control, among other applications. One of the techniques used is called Fast Field Cycling Nuclear Magnetic Resonance. This technique has specifications that make the equipment complex for carrying out tests. This work has as main objectives the project of assembly of the mechanical and thermal components of a Nuclear Magnetic Resonance Magnetic of Fast Field Cycling and the electromagnetic characterization of the same, with the ambition to make the prototype industrializable. For that, simulations are made using computational applications based on the finite element method, complemented with laboratory tests.

**Keywords:** Nuclear Magnetic Resonance, Fast Field Cycling, Fringing Effect, Electromagnet, Magnet, Project.

# Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao meu Orientador, Professor Doutor António Roque, pelo tema proposto e pelo interesse permanente, estando disponível para apoiar durante a realização do trabalho. Também pelo incentivo e pelas sugestões e críticas que contribuíram para melhorar a qualidade do trabalho.

Ao Professor Doutor Duarte Sousa por ter aceitado ser coorientador e pelo apoio e disponibilidade na realização e conclusão da dissertação.

Ao Professor Doutor Pedro Sebastião pela motivação e disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas e solucionar problemas de forma simples e cientificamente correta.

Ao coordenador do curso, Professor Doutor José Maia, pelo apoio não só na dissertação mas também ao longo do curso.

Aos professores do curso pelas palavras de incentivo e que também sempre se mostraram disponíveis para ajudar, partilhando um pouco do seu vasto conhecimento.

Ao Professor Ricardo Cláudio pelo apoio durante a execução da maquete.

À Varisom, pelo fabrico de peças para o espectrómetro, em particular ao Sr. Mário Sustelo, pelo grande apoio e recomendações para otimizar o dimensionamento do projeto.

Ao Engenheiro Afonso Gregório e Sr. Fernando Ferrinha (núcleo de oficinas do Instituto Superior Técnico) pelo apoio prestado no projeto e execução de peças para o espectrómetro.

Ao Intituto Politécnico de Setúbal e Instituto Superior Técnico pela disponibilização de meios e apoio na realização deste projeto.

A todos os colegas e amigos que ajudaram, de forma direta ou indireta, na realização deste trabalho, em especial ao Mestre Jorge Júnior, que esteve sempre presente.

Finalmente, à minha família pelo apoio económico durante a minha vida académica, pela motivação, preocupação e paciência, sem os quais não teria sido possível chegar a este patamar.



# Índice

Resumo .....	v
Abstract .....	vi
Agradecimentos .....	vii
Índice .....	ix
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xvi
Lista de Siglas e Acrónimos .....	xvii
Lista de Símbolos .....	xviii
Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1. Enquadramento e Motivação .....	2
1.2. Evolução da Técnica .....	5
1.3. Objetivos .....	7
1.4. Estrutura do documento .....	7
Capítulo 2 .....	9
Ressonância Magnética Nuclear .....	9
2.1. Introdução .....	10
2.2. Spin nuclear .....	10
2.3. Momento magnético de spin .....	11
2.4. Movimento de precessão .....	12
2.5. Níveis energéticos .....	13
2.6. Transições entre níveis de energia .....	16
2.7. Interação entre o campo principal ( $B_0$ ) e o sinal de radiofrequência .....	18
2.8. Relaxação Magnética Nuclear de Campo Cíclico Rápido .....	20
2.8.1. Limitações deste método .....	23
Capítulo 3 .....	25
Eletromagneto .....	25
3.1. Introdução .....	26
3.2. Núcleo ferromagnético .....	26
3.2.1. Correntes de Foucault .....	27
3.2.2. Efeito de franja .....	28
3.3. Bobinas principais .....	35
3.3.1. Relação entre corrente e indução magnética .....	37
3.3.2. Coeficiente de autoindução da bobina .....	38
3.3.3. Coeficiente de dispersão .....	41

<b>3.4. Bobinas auxiliares .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5. Homogeneidade do campo de indução magnética no entreferro .....</b>	<b>43</b>
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>49</b>
<b>Constituição do magneto .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. Circuito de prova .....</b>	<b>50</b>
4.1.1. <i>Dimensionamento do circuito de detecção .....</i>	<i>51</i>
4.1.2. <i>Fator de qualidade e picos de tensão .....</i>	<i>53</i>
<b>4.2. Sensor da indução de Zeeman .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3. Sistema de aquecimento e monitorização da temperatura .....</b>	<b>55</b>
4.3.1. <i>Temperatura da amostra .....</i>	<i>55</i>
4.3.2. <i>Temperatura do núcleo do eletromagneto .....</i>	<i>57</i>
<b>4.4. Sistema de arrefecimento.....</b>	<b>57</b>
<b>4.5. Sinalética .....</b>	<b>58</b>
<b>4.6. Sistema de rotação da amostra .....</b>	<b>59</b>
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>61</b>
<b>Desenhos técnicos do magneto .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. Modelagem em SolidWorks.....</b>	<b>62</b>
5.1.1. <i>Eletromagneto .....</i>	<i>62</i>
5.1.2. <i>Circuito de prova.....</i>	<i>64</i>
5.1.3. <i>Medição da indução de Zeeman .....</i>	<i>67</i>
5.1.4. <i>Circuito de passagem de ar (amostra) .....</i>	<i>68</i>
5.1.5. <i>Sinalética .....</i>	<i>72</i>
5.1.6. <i>Circuito de ventilação .....</i>	<i>72</i>
5.1.7. <i>Painéis .....</i>	<i>74</i>
5.1.8. <i>Sistema de pega.....</i>	<i>75</i>
<b>5.2. Execução e montagem.....</b>	<b>76</b>
5.2.1. <i>Aspetos práticos da implementação final .....</i>	<i>77</i>
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>79</b>
<b>Resultados experimentais .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1. Parâmetros das bobinas.....</b>	<b>80</b>
6.1.1. <i>Bobinas principais e auxiliares .....</i>	<i>80</i>
6.1.2. <i>Bobina de RF.....</i>	<i>82</i>
<b>6.2. Mapeamento do campo.....</b>	<b>83</b>
<b>6.3. Compensação do campo residual .....</b>	<b>89</b>
<b>6.4. Fator de franja.....</b>	<b>89</b>
<b>6.5. Ventilador .....</b>	<b>90</b>
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>91</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>91</b>
<b>7.1. Comentários finais .....</b>	<b>92</b>
<b>7.2. Perspetivas de trabalhos futuros .....</b>	<b>93</b>

<b>Bibliografia.....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo I .....</b>	<b>1</b>
<b><i>Parâmetros da simulação em FEMM.....</i></b>	<b>1</b>
<b>Anexo II .....</b>	<b>3</b>
<b>Cálculos do efeito de franja .....</b>	<b>3</b>
<b>Anexo III .....</b>	<b>5</b>
<b><i>Pinout fichas 3, 7 contactos e DB9 .....</i></b>	<b>5</b>
<b>Anexo IV .....</b>	<b>7</b>
<b>Desenhos técnicos.....</b>	<b>7</b>
<b>Anexo V .....</b>	<b>59</b>
<b>Esboços e peças do magneto.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo VI .....</b>	<b>63</b>
<b>Dimensões do núcleo ferromagnético.....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo VII .....</b>	<b>65</b>
<b>Painéis da caixa do magneto .....</b>	<b>65</b>
<b>Anexo VIII .....</b>	<b>67</b>
<b>Lista das peças criadas.....</b>	<b>67</b>
<b>Anexo IX .....</b>	<b>69</b>
<b>Lista de material .....</b>	<b>69</b>
<b>Anexo X .....</b>	<b>71</b>
<b>Sugestão de <i>sequência de montagem</i>.....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo XI .....</b>	<b>73</b>
<b>Testes ao ventilador.....</b>	<b>73</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Ciclo genérico simplificado do método de RMN de CCR [4].	3
Figura 1.2 – Diagrama de blocos do espectrómetro de RMN de CCR.	3
Figura 1.3 – Magneto de RMN-CCR <sup>2</sup> [4].	6
Figura 1.4 – Magneto de RMN-CCR <sup>3</sup> [4].	6
Figura 1.5 – Magneto de RMN-CCR <sup>4</sup> .	6
Figura 2.1 – Analogia entre o momento magnético de uma partícula e um micro íman.	11
Figura 2.2 – Alinhamento de partículas carregadas em função do campo.	11
Figura 2.3 – Representação do momento angular de uma partícula [4].	12
Figura 2.4 – Precessão de um núcleo quando aplicado um campo de indução magnética $B_0$ [4].	13
Figura 2.5 – Orientação dos spins com o campo $B_0$ .	14
Figura 2.6 – Representação de dois níveis de energia consecutivos [4].	14
Figura 2.7 – Representação clássica da distribuição dos momentos magnéticos para partículas com spin igual a $\frac{1}{2}$ [4].	15
Figura 2.8 – Transição de nível energético com a aplicação dos campos $B_0$ e $B_1$ , num núcleo com spin $\frac{1}{2}$ [4].	18
Figura 2.9 – Deslocamento do vetor $M_0$ com a aplicação do campo $B_1$ . a) $M_0$ sem aplicação de $B_1$ . b) $M_0$ com aplicação de $B_1$ . No referencial girante ( $x'$ , $y'$ , $z'$ ) não existe $B_0$ , como explicado no texto.	19
Figura 2.10 – Aplicação do campo $B_1$ , num referencial girante. (Movimentação da $M_0$ ).	20
Figura 2.11 – Precessão do vetor $M_0$ com a aplicação de impulsos de $B_1$ [4].	20
Figura 2.12 – Ciclo genérico do método de RMN de CCR [4].	21
Figura 2.13 – Determinação de pontos de $M_z(\tau E)$ para determinação de $T_1$ , através do método de RMN de CCR.	23
Figura 3.1 – Chapa de ferro do tipo “E”.	26
Figura 3.2 – Núcleo ferromagnético (mm).	27
Figura 3.3 – Representação das correntes de Foucault, $J$ , no núcleo (em corte).	28
Figura 3.4 – Fluxo magnético no núcleo.	29
Figura 3.5 – Plano central do entreferro (núcleo em corte).	29
Figura 3.6 – Distribuição típica da indução magnética ao longo do eixo central do entreferro [4].	30
Figura 3.7 – Simulações realizadas para determinar o efeito de franja (para $I = 3\text{ A}$ ).	31
Figura 3.8 – Indução magnética – resultados de simulação.	32
Figura 3.9 – Indução média no eixo central do entreferro (simulação para $lg$ de 15 mm).	33
Figura 3.10 – Fator de franja em função do comprimento do entreferro.	33
Figura 3.11 – Indução magnética na zona do entreferro e eixos de medição (vermelho).	34



Figura 3.12 – Distribuição da indução em $B_g + B_f$ para 3 cotas do eixo z (0; 5,5 e -5,5 mm).....	35
Figura 3.13 – Eletromagneto com bobinas principais.....	36
Figura 3.14 – Circuito magnético em corte e respetivo circuito equivalente. ....	37
Figura 3.15 – Circuito magnético equivalente simplificado. ....	37
Figura 3.16 – Circuito RL. ....	40
Figura 3.17 – Circuito RLC série.....	41
Figura 3.18 – Composição perpendicular de ambos os sinais [19].....	41
Figura 3.19 – Eletromagneto com bobinas principais e auxiliares. ....	42
Figura 3.20 – Volumes para a análise da homogeneidade no entreferro (núcleo em corte).....	43
Figura 3.21 – Superfícies Aa, Ac e Ac + Af no entreferro (núcleo em corte).....	44
Figura 3.22 – Distribuição da indução magnética na camada z = 0 mm – resultado de simulação. ....	45
Figura 3.23 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada z = 0 mm [mT] – resultado de simulação.....	45
Figura 3.24 – Distribuição da indução magnética na camada z = 5,5 mm – resultado de simulação. ....	46
Figura 3.25 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada z = 5,5 mm [mT] – resultado de simulação.....	46
Figura 3.26 – Distribuição da indução magnética na camada z = -5,5 mm – resultado de simulação. .....	47
Figura 3.27 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada z = -5,5 mm [mT] – resultado de simulação.....	47
Figura 4.1 – Circuito de prova no magneto. ....	50
Figura 4.2 – Funcionamento do circuito de prova durante a emissão [4]. ....	51
Figura 4.3 – Bobina RF. ....	52
Figura 4.4 – PCB do circuito de prova. ....	53
Figura 4.5 – Esquema de ligações da PCB do circuito de prova. ....	53
Figura 4.6 – Variação da corrente em função da frequência [28]. ....	54
Figura 4.7 – Sensor Hall. ....	55
Figura 4.8 – Resistência elétrica para aquecimento da amostra. ....	56
Figura 4.9 – Sensor de fluxo de ar.....	56
Figura 4.10 – Esquema elétrico do controlo de temperatura. ....	56
Figura 4.11 – PCB para o relé. ....	57
Figura 4.12 – Ventilador. ....	58
Figura 4.13 – PCB com LED's. ....	59
Figura 4.14 – Esquema da PCB LED's.....	59
Figura 4.15 – Sistema de rotação da amostra. ....	60
Figura 5.1 – Orientação do eletromagneto e polarização das bobinas. ....	62
Figura 5.2 – Fixação do eletromagneto.....	64

Figura 5.3 – Caixa de blindagem. ....	64
Figura 5.4 – Pormenor do entreferro em corte com o Dewar (mm). ....	65
Figura 5.5 – Dewar (vista lateral). ....	66
Figura 5.6 – Corte do sistema de fixação superior do Dewar. ....	66
Figura 5.7 – Anilha de alumínio (mm). ....	66
Figura 5.8 – Suporte do Dewar (vista interior). ....	67
Figura 5.9 – Localização do sensor de Hall. ....	67
Figura 5.10 – Configuração do circuito de passagem de ar. ....	68
Figura 5.11 – Fixação do sensor e ligação ao acessório <i>bulkhead</i> . ....	69
Figura 5.12 – Circuito de passagem de ar (vista lateral direita da caixa do magneto). ....	69
Figura 5.13 – Fim do circuito de passagem de ar na amostra. ....	71
Figura 5.14 – Circuito de passagem de ar instalado no magneto. ....	72
Figura 5.15 – Fixação da PCB para o relé. ....	72
Figura 5.16 – Ventilador. ....	73
Figura 5.17 – Conduta do ventilador. ....	73
Figura 5.18 – Circuito de ventilação. ....	74
Figura 5.19 – Pilar para painéis. ....	75
Figura 5.20 – Caixa do magneto (vistas exteriores). ....	75
Figura 5.21 – Maquete do magneto de RMN-CCR <sup>4</sup> . ....	77
Figura 5.22 – Isolamento térmico do sensor e do tubo de vidro. ....	77
Figura 5.23 – Ligações do eletromagneto. ....	78
Figura 6.1 – Esquema com 6 bobinas – método corrente alternada. ....	80
Figura 6.2 – Medição da indutância da bobina de RF. ....	82
Figura 6.3 – Mapeamento do campo com mesa de 3 eixos. ....	83
Figura 6.4 – Indução magnética no eixo central ( $y = 0\text{ mm}$ ). ....	84
Figura 6.5 – Distribuição da indução magnética na camada $z = 0\text{ mm}$ – resultado experimental. ....	85
Figura 6.6 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada $z = 0\text{ mm}$ – resultado experimental. ....	85
Figura 6.7 – Distribuição da indução magnética na camada $z = 7,5\text{ mm}$ – resultado experimental. .	86
Figura 6.8 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada $z = 7,5\text{ mm}$ – resultado experimental. ....	86
Figura 6.9 – Distribuição da indução magnética na camada $z = -5,5\text{ mm}$ – resultado experimental.	87
Figura 6.10 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada $z = -5,5\text{ mm}$ – resultado experimental. ....	87
Figura 6.11 – Teste ao ventilador – sem restrições. ....	90
Figura 7.1 - Magneto de RMN-CCR <sup>4</sup> . ....	92



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Exemplos de isótopos com as respectivas frequências de ressonância [4]. .....	17
Tabela 3.1 – Valores máximos e mínimos por superfície e área.....	48
Tabela 3.2 – Homogeneidade no volume central do entreferro. ....	48
Tabela 6.1 – Medição de resistências e indutâncias. ....	81
Tabela 6.2 – Valores máximos e mínimos.....	88
Tabela 6.3 – Homogeneidade nos volumes. ....	88
Tabela 6.4 – Indução magnética ao longo do eixo z ( $I = 1\text{ A}$ ).....	88
Tabela 6.5 – Medição do campo no método aditivo e subtrativo. ....	89
Tabela 6.6 – Campo residual. ....	89
Tabela 6.7 – Fator de franja.....	90

# Lista de Siglas e Acrônimos

AWG	<i>American Wire Gauge</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
CCR	Campo Cíclico Rápido
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
FID	<i>Free Induction Decay</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RF	Radiofrequência
RMN	Ressonância Magnética Nuclear

# Lista de Símbolos

$A_c$	Área do polo ( $m^2$ )
$A_f$	Área da franja ( $m^2$ )
$A_T$	Área total (polo e franja) ( $m^2$ )
$\vec{B}_1$	Indução magnética de radiofrequência (T)
$B_{max}$	Indução magnética máxima (T)
$B_{min}$	Indução magnética mínima (T)
$\vec{B}_0$	Indução magnética de Zeeman (T)
$B_{0D}$	Indução magnética de detecção (T)
$B_{0E}$	Indução magnética de evolução (T)
$B_{0P}$	Indução magnética de polarização (T)
$B_f$	Indução média na área $A_f$ (T)
$B_g$	Indução média na área $A_c$ (T)
$B_{nominal}$	Indução magnética nominal (T)
$C$	Capacidade do condensador (F)
$c$	Velocidade da luz no vácuo (km/s)
$d$	Diâmetro de forma do enrolamento (cm)
$E$	Energia potencial (J)
$f$	Frequência (Hz)
$f_0$	Frequência de ressonância (Hz)
$F_f$	Fator de franja
$\vec{H}$	Intensidade do campo magnético ( $Am^{-1}$ )

$h$	Constante de Plank (Js)
$\hbar$	Constante de Plank modificada (Js)
$I_{max}$	Corrente máxima (A)
$I$	Número quântico de spin
$i$	Corrente elétrica (A)
$\vec{j}$	Densidade de corrente ( $\text{Am}^{-2}$ )
$K_e$	Constante de perdas por correntes de Foucault ( $\text{Wkg}^{-1}$ )
$k$	Constante de Boltzmann ( $\text{JK}^{-1}$ )
$l_g$	Comprimento do entreferro (m)
$\vec{L}$	Número quântico de momento angular ( $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1} \text{rad}$ )
$l$	Comprimento (m)
$L$	Coeficiente de autoindução (H)
$\vec{M}_\alpha$	Magnetização resultante dos spins no sentido de $\vec{B}_0$ (T)
$\vec{M}_\beta$	Magnetização resultante dos spins no sentido de $\vec{B}_0$ (T)
$\vec{M}_0$	Magnetização resultante (T)
$M_z(t)$	Componente da magnetização paralela ao campo $\vec{B}_0$ (T)
$m_p$	Massa da partícula (kg)
$m$	Número quântico magnético
$n_1$	Densidade total de eletrões
$N_A$	Constante de Avogadro ( $\text{mol}^{-1}$ )
$N_{AP}$	Número de spins em antiparalelo
$N_P$	Número de spins em paralelo

$N$	Número de espiras
$n$	Número quântico principal
$P$	Potência (W)
$q$	Carga elétrica (C)
$R_L$	Resistência da bobina ( $\Omega$ )
$r$	Raio (m)
$T_1$	Tempo de relaxação <i>spin-rede</i> (s)
$T_2$	Tempo de relaxação <i>spin-spin</i> (s)
$T$	Temperatura (K)
$V$	Volume ( $m^3$ )
$V_a$	Volume da zona da amostra ( $m^3$ )
$V_c$	Volume da zona do entreferro ( $m^3$ )
$V_f$	Volume da zona do entreferro mais franja ( $m^3$ )
$\vec{v}$	Velocidade ( $ms^{-1}$ )
$v_L$	Tensão aos terminais de uma bobina (V)
$\nu$	Frequência da radiação (Hz)
$X_C$	Reatância capacitiva ( $\Omega$ )
$X_L$	Reatância indutiva ( $\Omega$ )
$\alpha$	Nível de menor energia (sistema de spins)
$\beta$	Nível de maior energia (sistema de spins)
$\gamma$	Constante giromagnética ( $rad\ T^{-1}\ s^{-1}$ )
$\Delta_{t_D}$	Intervalo de tempo de detecção (s)



$\Delta_{t_E}$	Intervalo de tempo de evolução (s)
$\Delta_{t_P}$	Intervalo de tempo de polarização (s)
$\delta_F$	Espessura da chapa do núcleo ferromagnético (mm <sup>2</sup> )
$\phi_T$	Fluxo magnético total (Wb)
$\phi_g$	Fluxo magnético no entreferro (Wb)
$\lambda$	Comprimento de onda (m)
$\vec{\mu}$	Momento magnético nuclear (Am <sup>2</sup> )
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo (TmA <sup>-1</sup> )
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa
$\rho$	Densidade da amostra (kg/m <sup>3</sup> )
$\varphi$	Desfasamento entre a tensão e a corrente (°)
$\psi$	Fluxo concatenado (Wb.esp)
$\omega_0$	Frequência de Larmor (rads <sup>-1</sup> )
$\omega$	Velocidade angular (rads <sup>-1</sup> )
$\Re$	Relutância (H <sup>-1</sup> )
$\Re_{eq}$	Relutância equivalente (H <sup>-1</sup> )
$\Re_{ig}$	Relutância no entreferro (H <sup>-1</sup> )



# Capítulo 1

## Introdução

O presente documento é o relatório de dissertação desenvolvida no âmbito do mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, realizada no Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal (IPS – ESTS), em parceria com o Instituto Superior Técnico (IST). O projeto teve um peso de 42 ECTS (*European Credit Transfer System*), com início a 25/02/2019 e fim a 15/06/2020. Neste Capítulo será realizada uma introdução a esta dissertação, sendo feito um enquadramento e onde serão apresentados os objetivos propostos. Ainda neste Capítulo é apresentado o estado de arte, que terá como principal foco a evolução do espectrómetro de Ressonância Magnética Nuclear de Campo Cíclico Rápido até à versão desenvolvida neste trabalho.

## 1.1. Enquadramento e Motivação

Este trabalho centra-se no desenvolvimento do projeto e na montagem de um magneto, para um espectrómetro de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) de Campo Cíclico Rápido (CCR). Um espectrómetro de RMN de CCR pode ser utilizado em várias áreas, como por exemplo em Física, Ciência dos Materiais, Medicina, Indústria Alimentar e petrolífera.

Este equipamento destina-se à implementação de técnicas de RMN, no estudo de diferentes materiais. Estas técnicas espectroscópicas consistem no estudo da interação entre os spins nucleares, de elementos selecionados, e os campos magnéticos a que se encontram sujeitos (campo magnético estático - indução magnética de Zeeman, campos magnéticos das ondas de rádio, com diferentes frequências, e campos magnéticos locais).

A situação de ressonância, correspondente à emissão e absorção de energia de radiofrequência (RF), ocorre quando a frequência de radiação é igual à frequência de Larmor, definida pelo produto entre a constante giromagnética e a indução magnética de Zeeman. Assim, a condição de Ressonância Magnética Nuclear pode ocorrer para campos magnéticos que, atualmente, chegam a 21 T e, correspondentemente, a frequências inferiores a 1,2 GHz [1], [2].

Uma vez que a RMN está associada à emissão/receção de ondas eletromagnéticas, verifica-se que a receção do sinal detetado é obviamente sujeito a ruído e que para valores de frequências, tipicamente, inferiores a 4 MHz, para o núcleo de hidrogénio, a relação sinal/ruído torna, significativamente, mais difícil a deteção de sinais. A razão sinal/ruído pode facilmente impedir a realização das experiências de RMN. Uma das grandezas que interessa medir em estudos de RMN é o tempo de relaxação spin-rede ( $T_1$ ), associado à dissipação da energia, que o sistema de spins nucleares absorveu da RF, para o ambiente (“rede”). A técnica convencional para medir  $T_1$  (“inversão-recuperação”) [3] consiste na aplicação de dois impulsos de RF, em ressonância com a frequência de Larmor, correspondente a um campo magnético constante. Em virtude das limitações associadas à relação sinal/ruído, esta técnica convencional de medida de  $T_1$  não é facilmente aplicável para baixas frequências. A técnica de RMN de CCR permite ultrapassar esta dificuldade, uma vez que a amostra é sujeita a ciclos de campo magnético de Zeeman,  $B_0$ , conforme ilustrado na Figura 1.1. O tempo de relaxação é medido para o valor de campo de nível inferior,  $B_{0E}$ , mas a deteção do sinal é feita quando o campo magnético está no nível superior,  $B_{0D}$ , permitindo uma relação sinal/ruído independente do campo magnético inferior. Deste modo, podem-se fazer mediadas de  $T_1$  para frequências de Larmor a baixo de 4 MHz, mantendo as condições de deteção equivalentes às que se tem com a técnica “inversão-recuperação”. O  $T_1$  é determinado através do sinal detetado, designado por FID “Free Induction Decay”, que começa a ser detetado imediatamente após o impulso de RF terminar.

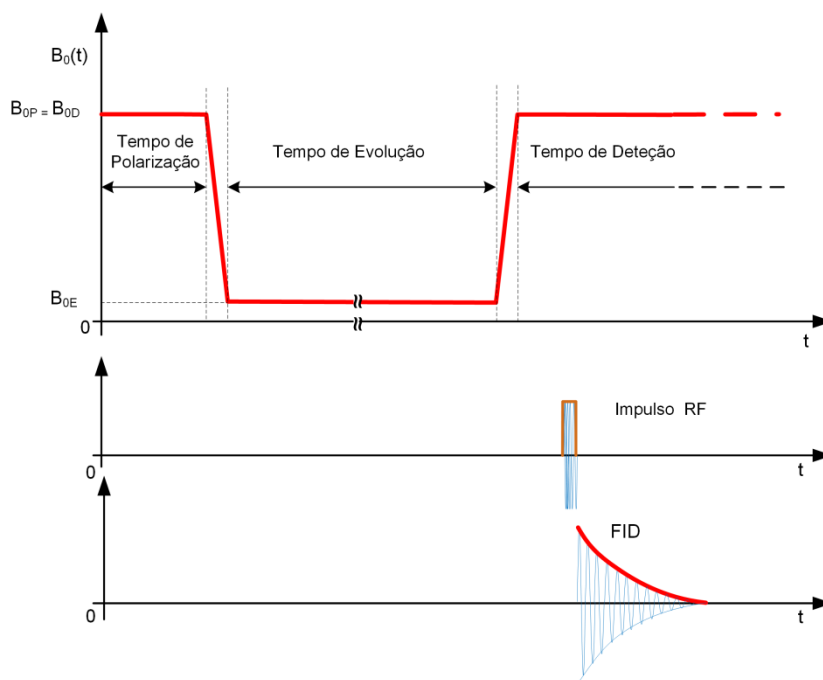


Figura 1.1 – Ciclo genérico simplificado do método de RMN de CCR [4].

O espectrómetro de RMN de CCR, do qual é parte integrante o magneto desenvolvido neste projeto, pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 1.2.

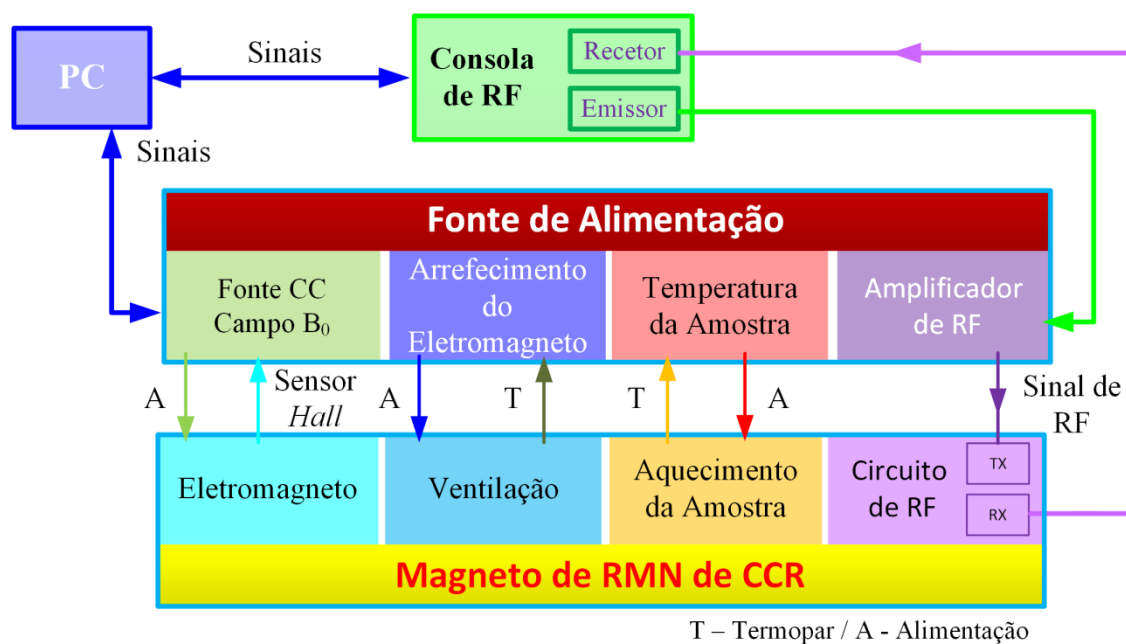


Figura 1.2 – Diagrama de blocos do espectrómetro de RMN de CCR.

O diagrama de blocos do espectrómetro de RMN de CCR da Figura 1.2 pode ser descrito de uma forma resumida:

- **PC**: Este bloco representa o PC onde é realizada interface entre o utilizador e o sistema de aquisição e tratamento do sinal detetado. Para isto, o PC é provido de

um *software* específico especialmente desenvolvido para a aplicação em causa, permitindo ainda auxiliar o controlo do sistema.

- Consola de RF: A consola de RF é constituída por um circuito emissor e por um circuito recetor.
  - Circuito Emissor: Neste circuito é gerado o sinal de RF e enviado para um amplificador de RF, que por sua vez o envia para a bobina de RF (TX);
  - Circuito Recetor: Este circuito recebe o sinal de RF (RX), proporcional à variação da magnetização irradiada pela amostra e envia-o para o sistema de aquisição;
  - Ponte de desacoplamento: A ponte de desacoplamento é constituída por dois díodos em antiparalelo onde é feita a separação entre o sinal emitido e o sinal detetado, garantindo o isolamento entre emissor e recetor.
- Fonte de alimentação: A fonte de alimentação é constituída por uma fonte de corrente continua (CC), um sistema de arrefecimento do eletromagneto, um controlador de temperatura e um amplificador de RF.
  - Fonte CC: Faz a alimentação das bobinas (principais e auxiliares) do eletromagneto. Esta fonte é provida de controlo, que responde ao controlo de indução magnética do entreferro do sistema, sendo para isso medida a indução magnética no entreferro através de um sensor de *Hall*;
  - Arrefecimento do eletromagneto: Este bloco é responsável pela alimentação do ventilador localizado no magneto;
  - Controlador de temperatura da amostra: Este bloco é responsável pelo controlo de temperatura desejada na amostra a analisar, sendo este controlo assegurado por um controlador proporcional-integral-derivativo (PID);
  - Amplificador de RF: O amplificador de RF amplifica o sinal proveniente da consola de RF e disponibiliza o sinal de saída à bobina de RF, colocada junto da amostra a analisar.
- Magneto de RMN de CCR: O magneto tem como principais componentes um eletromagneto, um ventilador, um circuito para ajustar a temperatura da amostra e um circuito de RF.
  - Eletromagneto: O eletromagneto é constituído pelo núcleo de ferro, pelas bobinas principais, responsáveis pela criação da indução magnética de Zeeman, e pelas bobinas auxiliares, responsáveis por criar uma indução magnética em antiparalelo com a indução magnética principal, de modo a eliminar o campo magnético coercivo e o campo magnético terrestre;
  - Ventilador: O ventilador colocado no magneto destina-se ao arrefecimento do eletromagneto;
  - Aquecimento da amostra: O circuito de aquecimento da amostra é ligado

a um circuito de ar, passando o ar por uma resistência elétrica, controlada pelo PID, e por um sensor de fluxo de ar, para garantir que existe ar no circuito. O ar aquecido é depois canalizado para a amostra a analisar;

- Circuito de RF: O circuito de RF é constituído pela bobina de RF (responsável pela criação da indução magnética oscilante perpendicular à indução magnética gerada pelo eletromagneto e pela receção do sinal da amostra), e condensadores de ajuste da frequência de ressonância.

Os equipamentos de RMN de CCR são equipamentos com custos muito elevados e com uma oferta no mercado reduzida. Para além do custo, estes equipamentos têm também dimensões e potências elevadas.

Um equipamento facilmente instalável em qualquer laboratório, de baixa potência, eficiente energeticamente, compacto, portátil e barato (comparado com as alternativas no mercado) ainda não está disponível no mercado. Assim, a motivação para a realização deste projeto consistiu em desenvolver um protótipo pré-industrial de um magneto para utilizar num espectrómetro de RMN de CCR.

## 1.2. Evolução da Técnica

Desde 1990 vem sendo desenvolvido, no Instituto Superior Técnico e nos últimos 10 anos em colaboração com a Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, um espectrómetro de bancada, fazendo este projeto parte integrante desse desenvolvimento. A versão RMN\_CCR<sup>3</sup>, versão anterior à versão deste projeto tem dimensões reduzidas e a potência, em regime estacionário, é de 120 W. O magneto de RMN-CCR<sup>4</sup> da versão deste projeto tem uma potência de 72 W atingindo-se uma indução magnética da ordem dos 0,3 T.

Nas versões iniciais desenvolvidas no IST, as bobinas responsáveis pela criação da indução magnética de Zeeman (indução magnética principal) eram bobinas com núcleo de ar, sendo por isso necessário uma maior corrente, maior volume e um sistema de arrefecimento do sistema mais complexo [5]. Na segunda e terceira versão foi utilizado um eletromagneto com núcleo ferromagnético obtendo-se a indução magnética desejada ( $\approx 0,2$  T) para uma menor potência da fonte, 200 W na versão RMN\_CCR<sup>2</sup> [4, 5]. Com esta versão (quarta) e utilizando a mesma topologia das versões dois e três e reduzindo o entreferro, passando de 2 cm para 1,5 cm, é obtido uma indução magnética superior ( $\approx 0,3$  T) para uma corrente de 3 A.

Na Figura 1.3 está representada a fonte de alimentação e o magneto da versão dois.



a) Fonte de Alimentação.



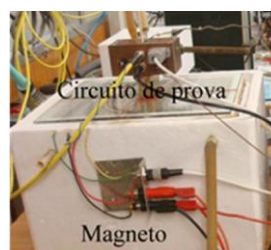
b) Magneto.

Figura 1.3 – Magneto de RMN-CCR<sup>2</sup> [4].

Na Figura 1.4 está representada a fonte de alimentação e o eletromagneto do espectrómetro de RMN-CCR<sup>3</sup>. A particularidade deste eletromagneto é que são utilizados supercondutores no eletromagneto, em torno do entreferro, para aumentar a homogeneidade e uniformidade da indução magnética no entreferro.



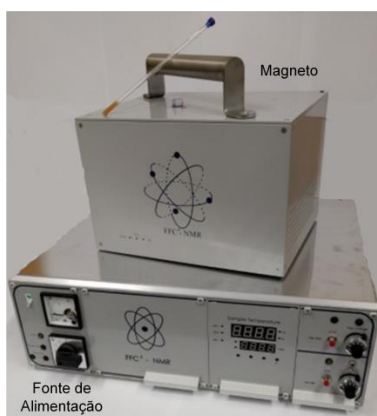
a) Fonte de Alimentação.



b) Magneto.

Figura 1.4 – Magneto de RMN-CCR<sup>3</sup> [4].

Para suprimir a utilização de azoto líquido para o arrefecimento dos supercondutores, que não é prático, foi feita uma versão do espectrómetro sem supercondutores. O ponto de início deste trabalho sucede da dissertação de mestrado do Eng. Pedro Videira "Fast-Field Cycling Nuclear Magnetic Resonance relaxometer's magnet with optimized homogeneity and reduced volume" [6], onde foi desenvolvido o eletromagneto. Esta versão está ilustrada na Figura 1.5.

Figura 1.5 – Magneto de RMN-CCR<sup>4</sup>.



## 1.3. Objetivos

De acordo com a motivação anterior, este trabalho tem como objetivos:

- Caracterização do magneto, nomeadamente, a medição dos coeficientes de indução através de diferentes métodos experimentais;
- Mapeamento 3D da indução magnética no entreferro do magneto por simulação e experimentalmente;
- Caracterização do efeito de franja em torno do entreferro;
- Conceção, projeto e implementação do encapsulamento do magneto.

## 1.4. Estrutura do documento

O presente documento encontra-se repartido em 7 Capítulos.

No Capítulo 1 (Introdução) foi feito um enquadramento do tema e apresentada a motivação para a realização da dissertação. Foram também apresentados os objetivos propostos, o estado de arte e a estrutura do documento.

No Capítulo 2 (Ressonância Magnética Nuclear) será abordado o fenómeno de RMN e o conceito de RMN de CCR, para que sejam identificadas as considerações a ter no projeto do magneto.

No Capítulo 3 (Eletromagneto) será apresentada a configuração do eletromagneto utilizado para a construção do magneto de RMN de CCR. Serão também apresentados os resultados das simulações feitas, auxiliando a caracterização da sua configuração.

No Capítulo 4 (Componentes do magneto de RMN de CCR) serão apresentados os componentes do magneto, onde será demonstrado o seu dimensionamento, mencionando as suas principais características.

No Capítulo 5 (Projeto e montagem do magneto) serão descritas as considerações tomadas durante o projeto do magneto. Será também apresentada a maquete construída do magneto e alguns detalhes de montagem.

No Capítulo 6 (Resultados experimentais) serão avaliados experimentalmente os resultados obtidos nas simulações e cálculos analíticos.

No Capítulo 7 (Conclusões) serão referidas as conclusões finais do trabalho e feitas algumas propostas para a continuação futura do trabalho.



# Capítulo 2

## Ressonância Magnética Nuclear

Neste Capítulo apresentam-se algumas considerações sobre o fenómeno da Ressonância Magnética Nuclear de Campo Cíclico Rápido (RMN de CCR).

Serão apresentadas algumas aplicações da espectroscopia por RMN do protão, métodos para interagir com os spins nucleares e apresentam-se métodos de análise da informação obtida com base na interação entre os spins influenciados pelos movimentos das moléculas.

Inicialmente será feita uma abordagem ao fenómeno de RMN e depois à técnica de RMN de CCR.

## 2.1. Introdução

Em espectroscopia estuda-se a interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Um dos fenómenos físicos estudados consiste em alterações nos níveis de energia de moléculas. Através de métodos espectroscópicos pode-se analisar a quantidade de radiação absorvida e emitida pelas moléculas. Estes métodos são classificados consoante a região do espectro eletromagnético que é utilizado. Cada tipo de radiação interage de forma diferente com a matéria uma vez que a quantidade de energia também varia, obtendo-se diferentes informações sobre a matéria que está a ser estudada. Estas informações podem ser utilizadas para auxiliar a caracterização e identificação de substâncias, estudar propriedades magnéticas, criar imagens para exames médicos e fazer controlo de qualidade de produtos (vinhos, petróleo, alimentos, etc.). Os equipamentos destinados à análise de radiação eletromagnética designam-se espectrómetros.

Existem vários tipos de espectroscopia, como por exemplo: ressonância magnética nuclear; ressonância paramagnética eletrónica; espectroscopia de micro-ondas; espectroscopia de infravermelho; espectroscopia UV/visível; espectroscopia de raio X; espectroscopia gama.

A espectroscopia por RMN está relacionada com o fenómeno da ressonância magnética nuclear. Alguns núcleos atómicos podem absorver/emitir energia na gama das radiofrequências, em particular quando estão submetidos a um campo magnético. Um exemplo são os núcleos átomos de hidrogénio que tem a vantagem destes existirem abundantemente na natureza. Verifica-se no entanto que este fenómeno se observa para qualquer núcleo com spin nuclear diferente de zero. Os estudos de RMN podem ser feitos em amostras no estado sólido, líquido ou gasoso. O equipamento desenvolvido no âmbito deste trabalho destina-se ao estudo de amostras que apresentem alguma fluidez (ex. líquidos, polímeros). Também se poderá utilizar na análise amostras no estado sólido, desde que estas sejam porosas e contenham partes líquidas no seu interior, como por exemplo esponjas.

## 2.2. Spin nuclear

O comportamento dos núcleos atómicos quando submetidos a um campo magnético é descrito pela mecânica quântica, com recurso a alguns números quânticos. O número quântico principal,  $n$ , que indica o nível de energia (ou camada eletrónica), o número quântico de momento angular,  $\vec{L}$ , que informa sobre a forma dos orbitais (quanto maior o seu valor, maior será o valor do momento angular), o número quântico magnético,  $m$ , que informa sobre a orientação espacial da orbital. Para além destes, o número quântico de spin,  $I$ , caracteriza as orientações do spin. Para o núcleo de hidrogénio pode assumir dois valores  $\left(-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right)$ . Numa visão de mecânica clássica seria análogo ao sentido de precessão de um momento angular de

um corpo em rotação.

Se um núcleo tiver número atômico ou número de massa ímpar tem um spin diferente de zero.

Na mecânica quântica, o momento magnético associado ao spin nuclear pode ser visto como uma propriedade magnética análoga àquela que poderia ser observada classicamente para o movimento de uma carga na superfície de um corpo em rotação, em torno do seu eixo, como se de um íman se tratasse (Figura 2.1) [7]. A representação desse eixo é feita vetorialmente.

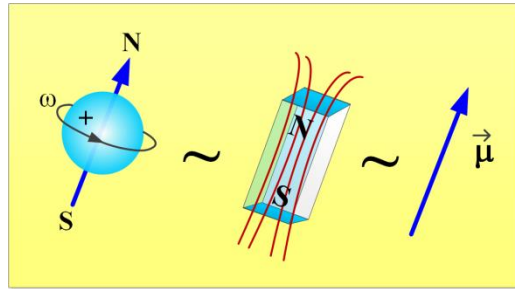
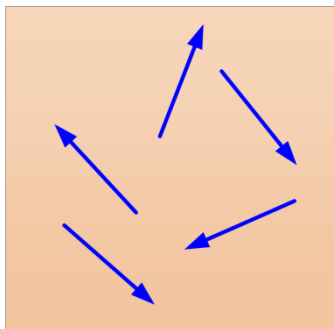
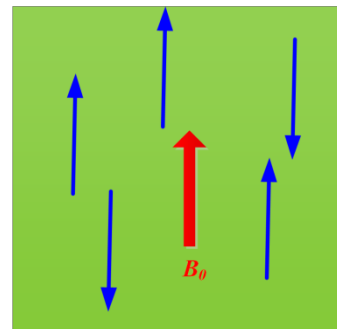


Figura 2.1 – Analogia entre o momento magnético de uma partícula e um micro íman.

A soma vetorial de todos esses “pequenos ímanes” normalmente é nula mas quando submetidos a um campo magnético, a maioria alinha-se com o campo e a outra parte alinha-se em sentido contrário, em resultado da agitação térmica (Figura 2.2).



a) Sem aplicação de indução magnética externa.



b) Com aplicação de indução magnética externa  $B_0$ .

Figura 2.2 – Alinhamento de partículas carregadas em função do campo.

## 2.3. Momento magnético de spin

A quantidade de movimento de uma partícula pode ser relacionada com velocidade angular através do momento angular,  $\vec{L}$ , conforme ilustrado na Figura 2.3 e representado por (2.1) [4].

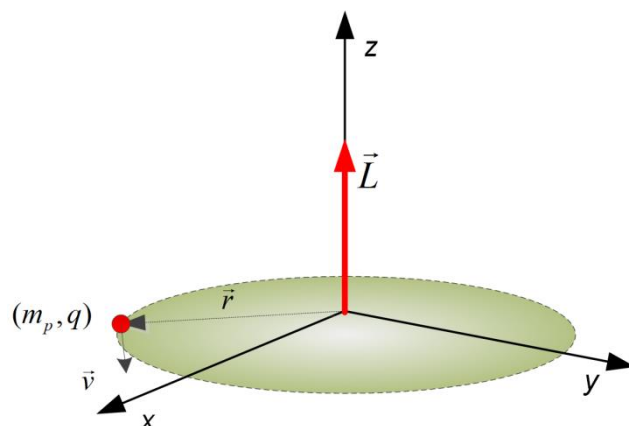


Figura 2.3 – Representação do momento angular de uma partícula [4].

$$\vec{L} = \vec{r} \times m_p \vec{v} \quad (2.1)$$

$\vec{r}$  é o raio da trajetória,  $m_p$  a massa da partícula e  $\vec{v}$  a velocidade.

Se se considerar uma partícula, a rodar sobre um eixo, com uma determinada carga,  $q$ , associada a uma corrente elétrica a circular numa espira, tem-se uma indução magnética (um momento magnético,  $\vec{\mu}$ ). Este momento pode ser relacionado com o momento angular através de (2.2) [4].

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{L} \quad (2.2)$$

$\gamma$  é a constante giromagnética. No caso do próton a constante giromagnética é dada por (2.3) [4].

$$\frac{\gamma_p}{2\pi} = 42,586 \text{ MHz} \cdot \text{T}^{-1} \quad (2.3)$$

O momento magnético de spin é uma característica intrínseca dos núcleos atômicos que dá origem a efeitos macroscópicos de magnetismo e, em particular, ao fenómeno de RMN.

## 2.4. Movimento de precessão

Como visto anteriormente, os spins dos núcleos atômicos alinham-se o campo. Este alinhamento com o campo é na realidade o alinhamento com a resultante de todos os campos aplicados. As partículas não se encontram isoladas pelo que se afetam mutuamente e também existe o campo magnético terrestre, que varia geograficamente entre 0,24 e 0,66 gauss<sup>(1)</sup> [8]. No entanto os valores destes campos são baixos, insuficientes para provocar o alinhamento, estando as partículas aleatoriamente direcionadas, daí que no estado natural a magnetização

<sup>1</sup> 1 Tesla = 10000 Gauss.

resultante seja praticamente nula. Mas ao contrário do que está representado na Figura 2.2, os spins não estão perfeitamente alinhados com a direção do campo mas sim em precessão, em torno do eixo representado pelo vetor resultante da indução magnética. A este movimento, ilustrado na Figura 2.4, está associada uma velocidade angular,  $\omega_0$ .

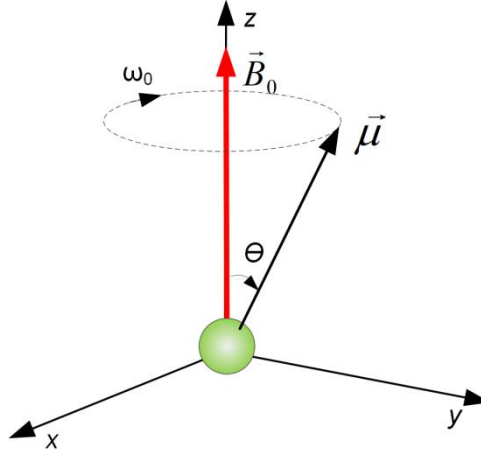


Figura 2.4 – Precessão de um núcleo quando aplicado um campo de indução magnética  $\vec{B}_0$  [4].

A velocidade angular a que um núcleo fica sujeito depende do valor da indução magnética e da constante giromagnética, sendo a relação dada por (2.4) [4].

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (2.4)$$

$\omega_0$  é designada frequência de Larmor.

## 2.5. Níveis energéticos

Quando se aplica um campo de indução magnética de Zeeman,  $\vec{B}_0$ , (que depende essencialmente da comparação entre a intensidade do campo magnético externo relativamente ao interno do átomo, ou seja, um campo “forte o suficiente”), dá-se a orientação dos spins segundo o campo externo. Do ponto de vista do sistema quântico, isto corresponde à separação da energia do sistema em níveis de energia (efeito de Zeeman). No caso do hidrogénio observam-se dois níveis, ilustrados na Figura 2.5, uma vez que este tem um momento angular de spin,  $m$ , quantificado, com apenas dois valores possíveis,  $\left(-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right)$ .

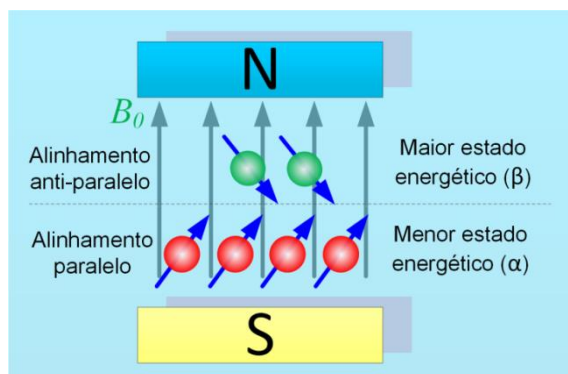


Figura 2.5 – Orientação dos spins com o campo  $\vec{B}_0$ .

Esses dois níveis de energia potencial podem ser designados  $\alpha$  e  $\beta$ , estando associados a valores dados por (2.5) [4].

$$E = -\mu B_0 = -\gamma(m\hbar) B_0 \quad (2.5)$$

$\hbar$  é a constante de Planck,  $h$ ,<sup>(2)</sup> modificada, dada por (2.6) [4].

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (2.6)$$

Convencionalmente define-se com  $\downarrow$  um spin com maior energia e com  $\uparrow$  um spin com menor energia. Representação gráfica na Figura 2.6.

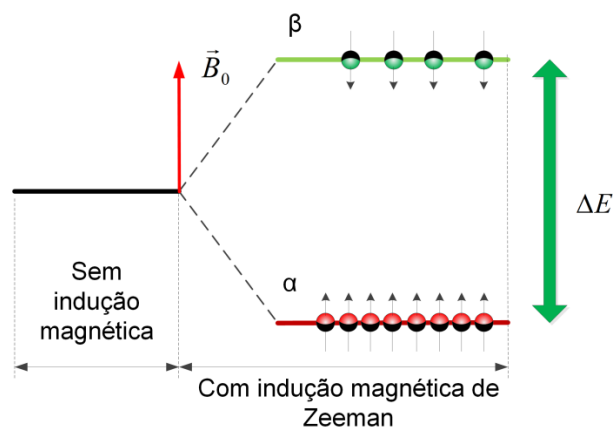


Figura 2.6 – Representação de dois níveis de energia consecutivos [4].

A diferença de energia entre os dois níveis energéticos consecutivos é descrita através de (2.7) [4].

$$\Delta E = E_\beta - E_\alpha = \gamma \hbar B_0 \quad (2.7)$$

<sup>2</sup>  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$



$E_\beta$  é a energia do nível mais energético e  $E_\alpha$  a energia do nível menos energético.

Numa amostra, quando sujeita à indução  $\vec{B}_0$ , a distribuição dos spins não é equivalente entre os níveis de energia. Os spins distribuem-se de acordo com a lei de Boltzmann (2.8) [9].

$$\frac{N_P}{N_{AP}} = e^{\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)} \quad (2.8)$$

$N_P$  é o número de spins alinhados no sentido do campo e  $N_{AP}$  o número de spins alinhados no sentido oposto ao campo magnético,  $k$  é a constante de Boltzmann<sup>(3)</sup> e  $T$  é a temperatura absoluta em kelvin.

É possível verificar que numa situação de equilíbrio ficam sempre mais spins nos níveis inferiores de energia. Desta forma, a magnetização resultante dos spins no sentido de  $\vec{B}_0$ ,  $\vec{M}_\alpha$ , é superior à magnetização resultante dos spins no sentido oposto a  $\vec{B}_0$ ,  $\vec{M}_\beta$ . Daí que a magnetização resultante,  $\vec{M}_0$ , não seja nula, ilustrado na Figura 2.7. Por outro lado, quanto maior for o volume da amostra,  $V$ , maior será a magnetização resultante, dada por (2.9) [4]. Esta magnetização é macroscópica, atribuindo a propriedade magnética aos núcleos atômicos.

$$\vec{M}_0 = \frac{1}{V} \sum_{i=0}^N \vec{\mu}_i \quad (2.9)$$

$N$  representa o número de spins.

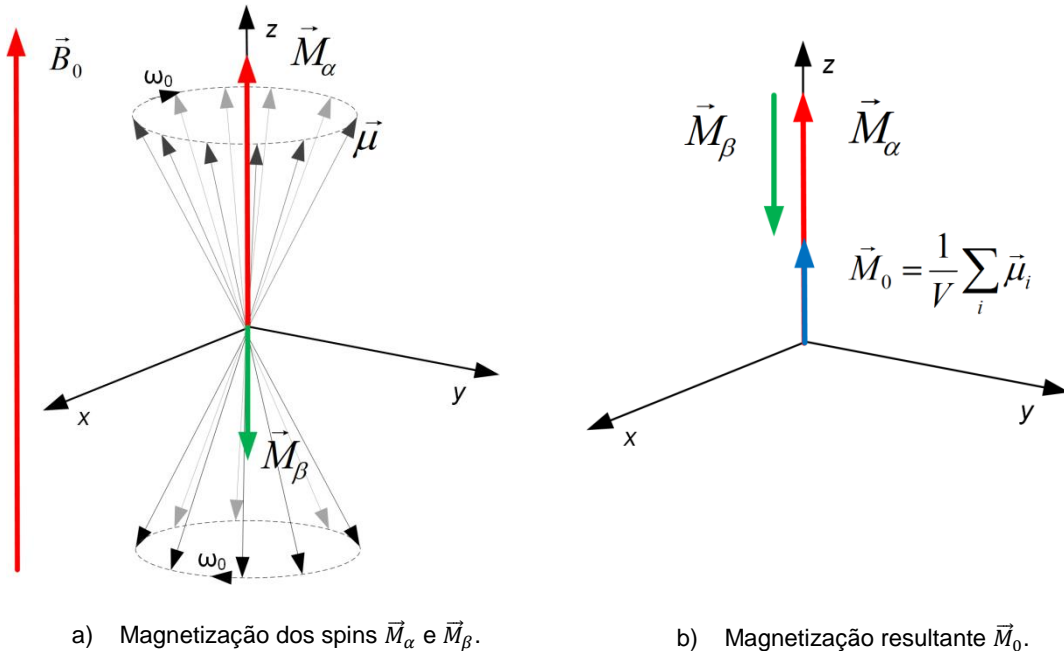


Figura 2.7 – Representação clássica da distribuição dos momentos magnéticos para partículas com spin igual a  $\frac{1}{2}$  [4].

<sup>3</sup> Constante de Boltzmann  $k = 1,3805 \times 10^{-23}$  J/K

Como  $\vec{\mu}$  depende de  $\vec{B}_0$ ,  $\vec{M}_0$  depende de  $\vec{B}_0$  numa relação proporcional, também definida como lei de Curie [10].

Para a observação do fenómeno de RMN, o número de spins nucleares que interessa considerar está relacionado com a quantidade do elemento químico presente na substância em análise. Uma mole de moléculas consiste num número de moléculas dado pela constante de Avogadro<sup>(4)</sup>,  $N_A$ . Considerando o caso da água ( $H_2O$ ), que tem uma massa molar de 18 g<sup>(5)</sup>, verifica-se que uma grama de água tem  $N_A/18$  moléculas. Como existem 2 spins nucleares de hidrogénio em cada molécula de água, o número de spins numa grama de água disponíveis para o processo de RMN será aproximadamente  $6,691 \times 10^{22}$  spins/g. Para se saber a densidade de spins é necessário ter em consideração a densidade da amostra,  $\rho$ . No caso da água, em condições STP (*Standard Temperature and Pressure*),  $\rho = 1$  g/cm<sup>3</sup>. Deste modo verifica-se que em condições normais de pressão e temperatura a densidade de spins é de  $6,691 \times 10^{22}$  spins/cm<sup>3</sup>.

## 2.6. Transições entre níveis de energia

No ponto 2.5 definiu-se a diferença de energia entre dois níveis consecutivos. Então, para que se dê a transição do núcleo entre níveis energéticos é necessário fornecer-lhe energia. Também como já referido, o núcleo pode absorver/emitir energia na gama das radiofrequências, quando sujeito a uma indução magnética.

Esta transferência de energia é possível colocando uma antena de RF (uma pequena bobina) perto da amostra, colocada de forma a gerar um campo de indução magnética,  $\vec{B}_1$ , orientado numa direção perpendicular a  $\vec{B}_0$ .

A transferência de energia ocorre de acordo com a expressão de Planck e de Einstein, representada por (2.10) [11].

$$|\Delta E| = h\nu = \hbar\omega \quad (2.10)$$

$\nu$  e  $\omega$  representam a frequência da radiação.

(2.10) representa a essência do fenómeno de RMN uma vez que quando  $\omega$  for igual a  $\omega_0$  se obtém, através de (2.4) e (2.10), (2.11).

$$\gamma \hbar B_0 = h\nu \Leftrightarrow \nu = \frac{\gamma B_0}{2\pi} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (2.11)$$

Verifica-se assim que o processo de RMN depende da relação entre os valores do campo

<sup>4</sup> Constante de Avogadro  $N_A = 6,02214076 \times 10^{23}$ .

<sup>5</sup> O hidrogénio tem a massa molar de 1 g e o oxigénio tem a massa molar de 16 g, logo  $m_{H_2O} = 2 \times 1 + 1 \times 16$  g.

magnético  $\vec{B}_0$  e os valores da radiofrequência  $\nu$ , quando estes interagem com o sistema de spins nucleares.

Na tabela 2.1 apresentam-se para alguns isótopos: o valor do spin nuclear, a abundância relativa na natureza, a sensibilidade relativa<sup>(6)</sup>, a constante giromagnética do núcleo e a frequência de ressonância nuclear para dois valores de  $\vec{B}_0$ .

Tabela 2.1 – Exemplos de isótopos com as respetivas frequências de ressonância [4].

Isótopos	Spin I	Abundância na natureza [%]	Sensibilidade Relativa	Constante Giromagnética $\gamma$		Frequência RMN [MHz.T <sup>-1</sup> ]	
				[10 <sup>6</sup> rad.s <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup> ]	[MHz.T <sup>-1</sup> ]	1[T]	0,2081 [T]
<sup>1</sup> H	1/2	99,985	1	267,576	42,586	42,586	8,862
<sup>2</sup> H	1	0,015	9,65E-03	41,065	6,536	6,536	1,360
<sup>3</sup> H	1/2	-	1,21	285,350	45,415	45,415	9,451
<sup>3</sup> Li	1	7,42	8,50E-03	39,371	6,266	6,266	1,304
<sup>10</sup> B	3	19,58	1,99E-02	28,747	4,575	4,575	0,952
<sup>11</sup> B	3/2	80,42	0,17	85,487	13,606	13,606	2,831
<sup>12</sup> C	0	98,9	-	-	-	-	-
<sup>13</sup> C	1/2	1,108	1,59E-02	67,283	10,708	10,708	2,228
<sup>14</sup> N	1	99,63	1,01E-03	19,338	3,078	3,078	0,640
<sup>15</sup> N	1/2	0,37	1,04E-03	-27,126	-4,317	-4,317	-0,898
<sup>16</sup> O	0	99,96	-	-	-	-	-
<sup>17</sup> O	5/2	0,037	2,91E-02	-36,280	-5,774	-5,774	-1,202
<sup>19</sup> F	1/2	100	0,83	251,815	40,078	40,078	8,340
<sup>23</sup> Na	3/2	100	9,25E-02	70,704	11,253	11,253	2,342
<sup>25</sup> Mg	5/2	10,13	2,67E-03	-16,389	-2,608	-2,608	-0,543
<sup>29</sup> Si	1/2	4,7	7,84E-03	-53,190	-8,465	-8,465	-1,762
<sup>31</sup> P	1/2	100	6,63E-02	108,394	17,251	17,251	3,590
<sup>39</sup> K	3/2	93,1	5,08E-04	12,499	1,989	1,989	0,414
<sup>43</sup> Ca	7/2	0,145	6,40E-03	-18,028	-2,869	-2,869	-0,597
<sup>57</sup> Fe	1/2	2,19	3,37E-05	8,687	1,383	1,383	0,288
<sup>59</sup> Co	7/2	100	0,28	63,015	10,029	10,029	2,087
<sup>119</sup> Sn	1/2	8,58	5,18E-02	-100,318	-15,966	-15,966	-3,323
<sup>133</sup> Cs	7/2	100	4,74E-02	35,339	5,624	5,624	1,170
<sup>195</sup> Pt	1/2	33,8	9,94E-03	58,383	9,292	9,292	1,934

De todos os elementos, o hidrogénio e o fluor são os dois dos mais utilizados em RMN. Pode-se ver que existem em grandes quantidades na natureza e têm uma boa sensibilidade.

Se se considerar um campo de 0,319 T (valor máximo produzido pelo magneto estudado neste trabalho, a ver no ponto 6.2) obtém-se uma frequência de aproximadamente 13,585 MHz, para o isótopo <sup>1</sup>H, de acordo com (2.11).

<sup>6</sup> Podemos descrever a sensibilidade relativa como a capacidade relativa de emitir sinais com maior ou menor intensidade, dependendo da abundância relativa e da interação que os spins têm entre si e com o ambiente envolvente.

## 2.7. Interação entre o campo principal ( $\vec{B}_0$ ) e o sinal de radiofrequência

Do ponto de vista quântico, quando se coloca uma indução magnética oscilante ( $\vec{B}_1$ ) perpendicular a  $\vec{B}_0$ , com frequência  $\omega_0$ , é possível transferir energia com o núcleo atômico, fazendo a transição de nível energético desse núcleo. Significa isto que o sistema de spins é perturbado. Alguns spins irão transitar do nível de menor energia para o de maior energia. A este processo designa-se excitação, ilustrado na Figura 2.8. O processo inverso, onde há libertação de energia pelo núcleo, designa-se relaxamento. É a este fenómeno que se designa Ressonância Magnética Nuclear.

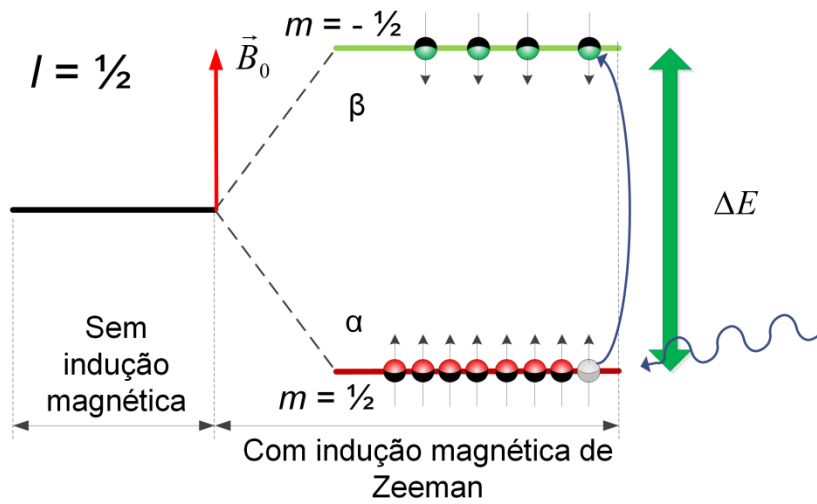


Figura 2.8 – Transição de nível energético com a aplicação dos campos  $\vec{B}_0$  e  $\vec{B}_1$ , num núcleo com spin  $\frac{1}{2}$  [4].

A alteração da distribuição dos spins vai afetar a magnetização resultante,  $\vec{M}_0$ . Do ponto de vista clássico, a excitação e relaxação e a evolução da orientação da magnetização no espaço é descrito pelas equações de Bloch (2.12) [4].

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{B}_0) + \gamma(\vec{M} \times \vec{B}_1) - \frac{(M_x \hat{i} + M_y \hat{j})}{T_2} - \frac{(M_z - M_0) \hat{k}}{T_1} \quad (2.12)$$

Nesta equação, os termos que envolvem o produto externo da magnetização com o campo magnético são os que traduzem o movimento de precessão do vetor de magnetização em torno da direção do campo magnético. Os termos restantes descrevem os processos de relaxação, que dependem de duas constantes de tempo características: o tempo de relaxação *spin-spin*  $T_2$  e o tempo de relaxação *spin-rede*  $T_1$ .  $T_2$  está associado aos processos que envolvem as transições entre níveis de energia que mantém a população dos dois níveis.  $T_1$  está associado aos processos que envolvem as transições do nível de energia mais alto para o

nível mais baixo, passando o nível de energia mais baixo a ter a maior população (“o sistema de spins arrefece”).

A evolução da magnetização ao longo do tempo, num intervalo de tempo muito curto, comparado com  $T_1$  e  $T_2$ , na presença do campo de radiofrequência  $\vec{B}_1$  pode ser mais facilmente compreendido num referencial girante  $(x', y', z')$  com  $(z = z')$  que roda em torno do eixo  $z$ , com uma frequência angular  $\omega_0$ . Nesse referencial o termo de (2.12),  $\vec{M} \times \vec{B}_0$ , não existe e o campo magnético  $\vec{B}_1$  é estático alinhado com  $x'$ . No referencial girante a magnetização precessa em torno da direção do campo  $\vec{B}_1$ , como ilustrado na Figura 2.9. Nesta Figura representa-se a evolução da magnetização durante um intervalo de tempo suficiente para que a magnetização rode  $90^\circ$  em torno do eixo  $x'$ .

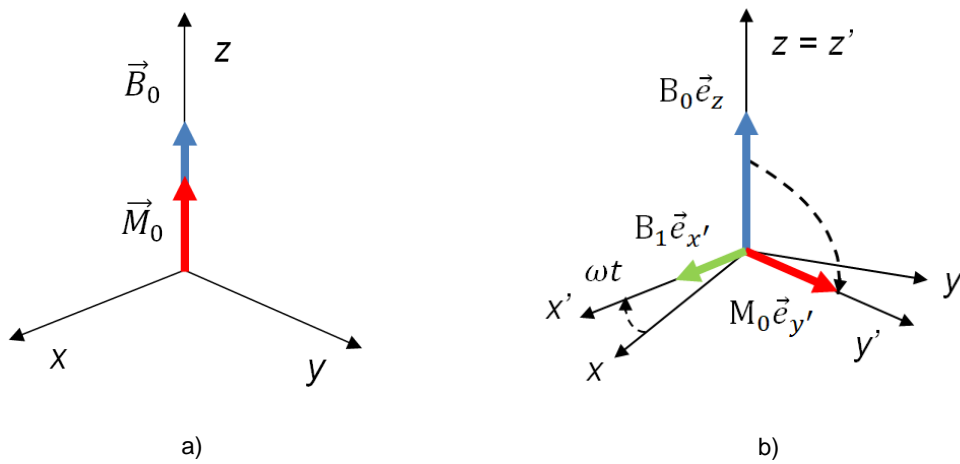


Figura 2.9 – Deslocamento do vetor  $\vec{M}_0$  com a aplicação do campo  $\vec{B}_1$ . a)  $\vec{M}_0$  sem aplicação de  $\vec{B}_1$ . b)  $\vec{M}_0$  com aplicação de  $\vec{B}_1$ . No referencial girante  $(x', y', z')$  não existe  $\vec{B}_0$ , como explicado no texto.

Na Figura 2.10 ilustra-se a evolução da magnetização para um sinal de radiofrequência com um tempo longo na ausência de relaxação. No referencial girante a magnetização inicial está alinhada com o campo magnético  $\vec{B}_0$  e o eixo  $z$  e vai precessar em torno do eixo  $x'$ , ficando cada vez mais alinhado com  $x'$ . No limite ficaria alinhado com  $\vec{B}_1$ . Na situação mais comum o impulso de radiofrequência é da ordem dos  $\mu s$ , sendo suficiente para rodar a magnetização de  $90^\circ$  ou  $180^\circ$ , em torno do eixo  $x'$ . A fase inicial do sinal de RF pode ser utilizada para definir o eixo do referencial girante em torno do qual a magnetização vai rodar, por exemplo, se a fase inicial do impulso for  $90^\circ$  e não  $0^\circ$  a magnetização poderá rodar em torno do  $y'$  em vez de  $x'$ .

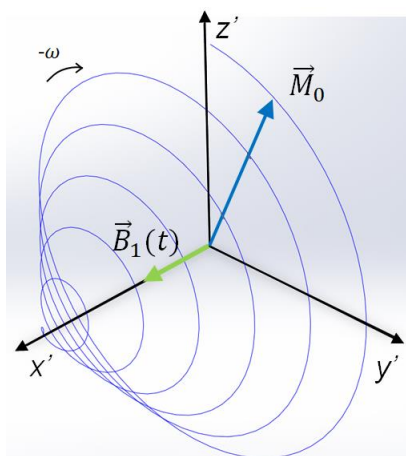


Figura 2.10 – Aplicação do campo  $\vec{B}_1$ , num referencial girante. (Movimentação da  $\vec{M}_0$ ).

A evolução da magnetização num referencial de laboratório é bastante mais complexa do ponto de vista da observação no espaço. Na Figura 2.11. ilustra-se a evolução da magnetização durante a aplicação da RF, durante tempo suficiente para promover a inversão da magnetização (rodar a magnetização de  $180^\circ$ ). Verifica-se que a magnetização descreve um movimento em espiral.

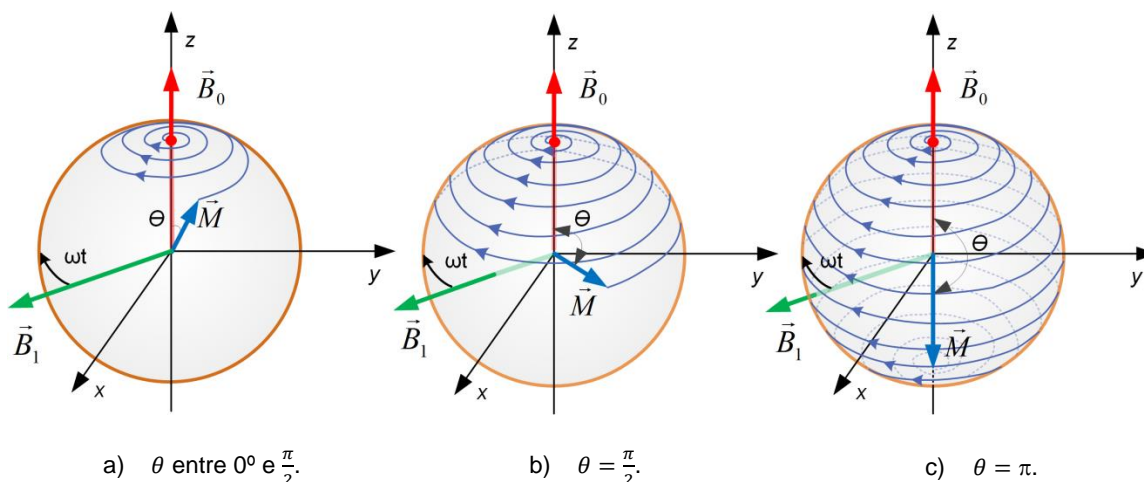


Figura 2.11 – Precessão do vetor  $\vec{M}_0$  com a aplicação de impulsos de  $\vec{B}_1$  [4].

## 2.8. Relaxação Magnética Nuclear de Campo Cíclico Rápido

A relaxação magnética nuclear é um dos aspetos mais importantes em RMN. As técnicas de relaxação magnética nuclear permitem medir os tempos de relaxação *spin-spin* e *spin-rede*. As técnicas convencionais de medida de  $T_2$  e  $T_1$  apresentam uma relação sinal/ruído que depende do valor do campo magnético  $B_0$ . Verifica-se que para valores de campo  $B_0$  inferiores a 0,1 T a relação sinal/ruído rapidamente se torna desfavorável à medida dos tempos de

relaxação. A técnica de relaxação de Campo Cíclico Rápido (CCR) permite ultrapassar a limitação prática das técnicas convencionais. Esta técnica destina-se essencialmente à determinação do valor do tempo de relaxação *spin-rede* (longitudinal),  $T_1$ .

Um ciclo do método de RMN de CCR inicia-se com a indução magnética de polarização  $B_{0P}$ , com o objetivo de fazer a polarização da amostra. Após um intervalo de tempo,  $\Delta t_P$ , a amostra é submetida à indução magnética de evolução  $B_{0E}$ , durante  $\Delta t_E$ . A amostra é então submetida à indução magnética de deteção  $B_{0D}$ , que pode ser igual a  $B_{0P}$ , durante  $\Delta t_D$ . Este ciclo genérico encontra-se ilustrado na Figura 2.12.

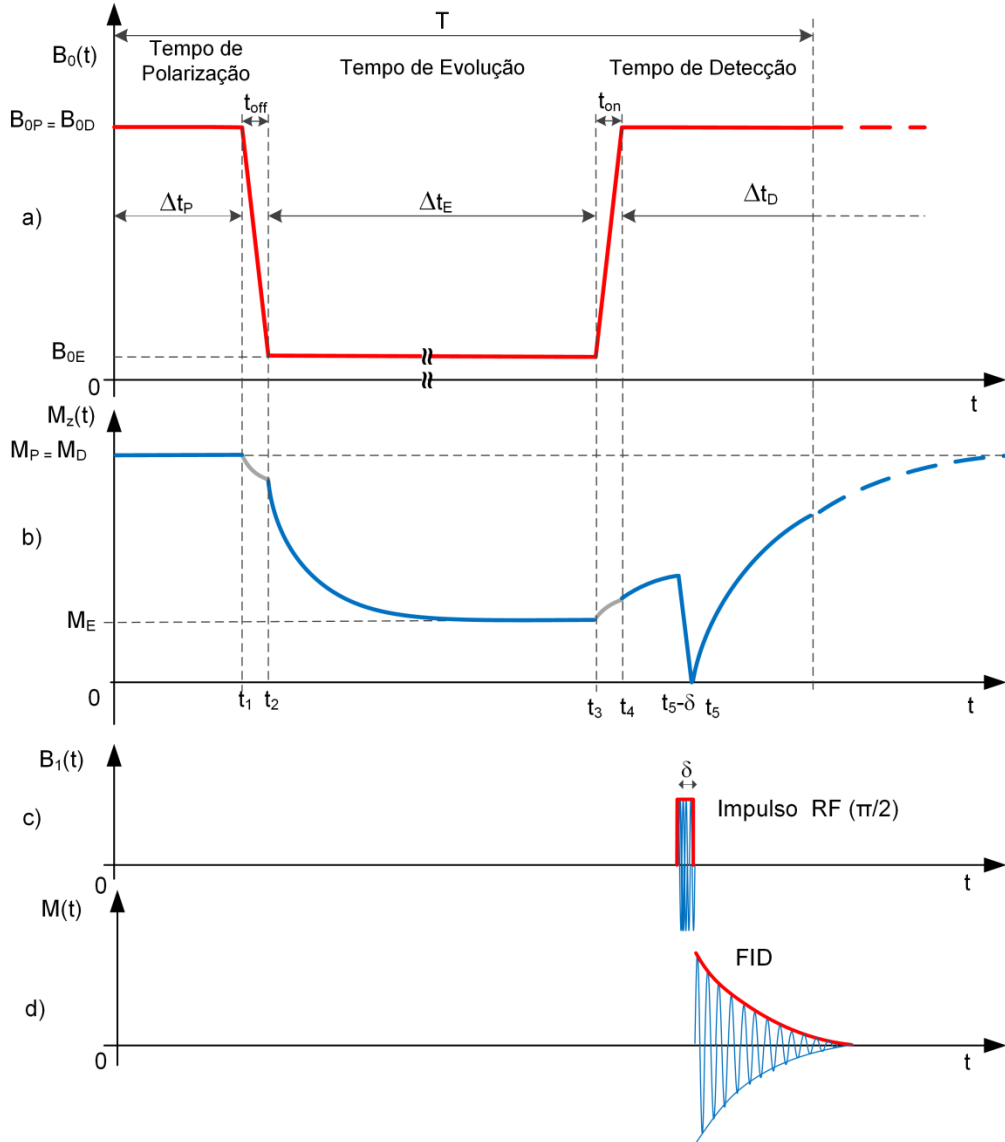


Figura 2.12 – Ciclo genérico do método de RMN de CCR [4].

A evolução da componente da magnetização paralela ao campo  $\vec{B}_0$ ,  $M_z(t)$ , depende do valor da indução magnética e do tempo  $T_1$ , sendo que é desta evolução que se pode determinar o valor de  $T_1$ . Entre  $t_2$  e  $t_3$  a evolução desta componente da magnetização é dada pela expressão (2.13), obtida a partir de (2.12). Após  $t_4$  a evolução é dada por (2.14).

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z(t) - M_{0P}}{T_1(B_{0E})} \quad (2.13)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z(t) - M_{0E}}{T_1(B_{0P})} \quad (2.14)$$

Para fazer a medição do tempo de relaxação é necessária a redução da intensidade da indução magnética. Esta medição poderia ser feita no instante  $t_3$ . No entanto o sinal detetado (FID) tem uma amplitude muito baixa (na ordem dos  $\mu V$ ), pelo que o ruído associado ao sinal pode ser significativo, sendo a relação sinal/ruído dada por (2.15) [4], [12], [13].

$$\frac{S}{R} \propto B_0^{\frac{3}{2}} \quad (2.15)$$

A proporcionalidade entre a relação sinal/ruído e a indução magnética depende de vários fatores, como por exemplo, a bobina de RF, o número de spins nucleares considerados e a temperatura da amostra [4].

Para garantir o melhor resultado possível, a medição deve ser feita para a maior indução magnética de deteção possível. Motivo pelo qual a deteção do sinal apenas é feita para  $B_{0D}$ .

Se os tempos de comutação poderem ser desprezados, sendo muito inferiores a  $T_1$ , e tendo em conta que quanto maior for o valor de  $B_0$ , maior será o  $T_1$ , pode-se considerar que, com a variação de  $\Delta_{t_E}$ , obtém-se pontos da exponencial decrescente. Na Figura 2.13 é ilustrada a variação de  $\Delta_{t_E}$ , na alínea b), de forma a se obterem os pontos da exponencial decrescente,  $M_z(\tau_E)$ , sendo a exponencial decrescente caracterizada por (2.16) e os pontos determinados experimentalmente ilustrados na alínea c). Na mesma alínea é ilustrado como se pode utilizar o FID para a determinação dos pontos. Note-se que, como ilustrado nas alíneas a) e b), os tempos de comutação foram desprezados.

$$e^{-\frac{\tau_E}{T_{1E}}} \quad (2.16)$$



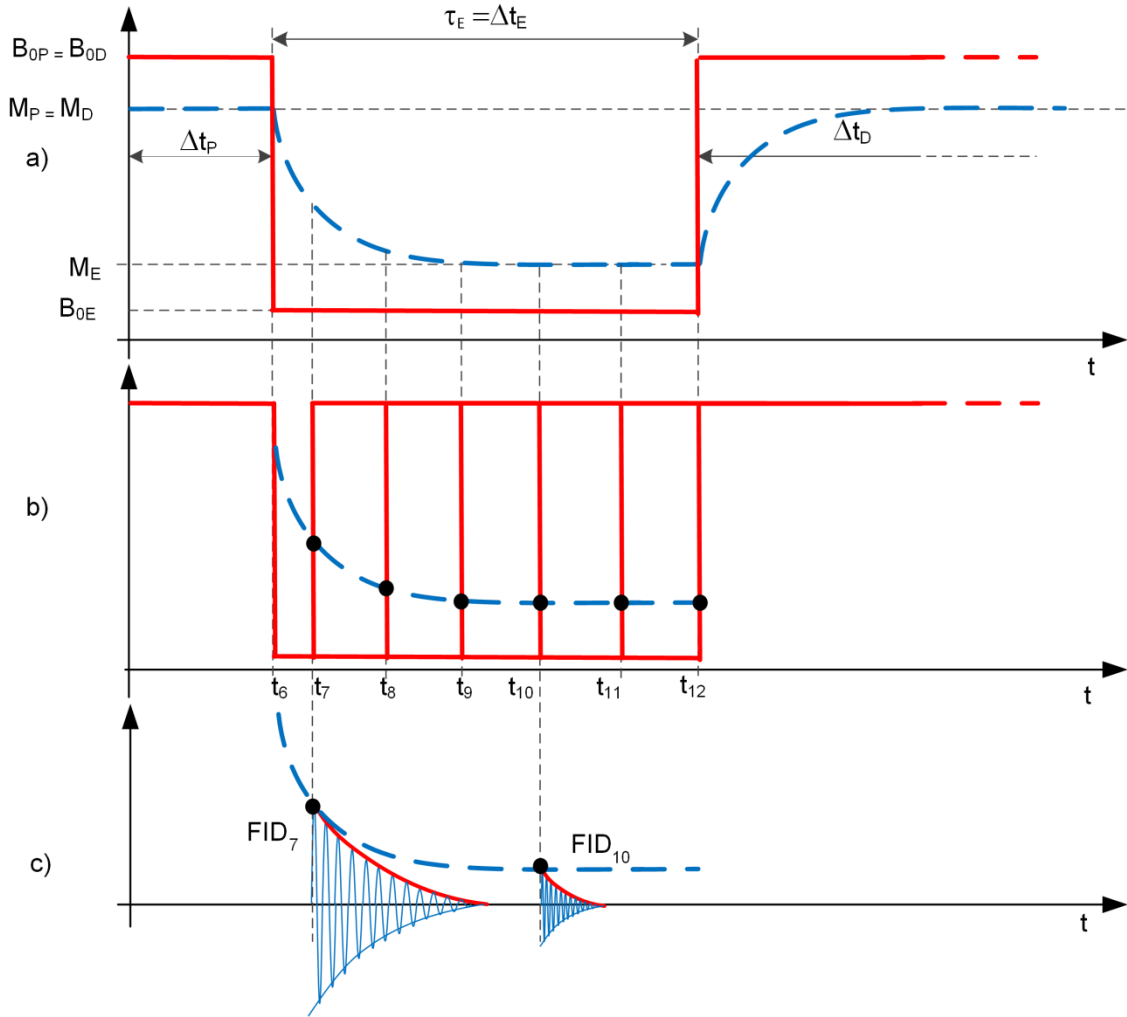


Figura 2.13 – Determinação de pontos de  $M_z(\tau_E)$  para determinação de  $T_1$ , através do método de RMN de CCR.

### 2.8.1. Limitações deste método

De forma a que os ensaios, recorrendo a este método, possam apresentar melhores resultados, os fatores que se seguem devem ser tidos em consideração.

#### 2.8.1.1. Estabilidade térmica

Sendo que os resultados obtidos através deste método variam consoante a temperatura da amostra, é importante que a sua temperatura seja mantida constante durante o processo. No caso deste projeto é utilizado um eletromagneto para produzir o campo  $\vec{B}_0$ , existindo perdas nas bobinas por efeito de Joule. Estas perdas podem afetar a estabilidade térmica da amostra.

#### 2.8.1.2. Precisão da indução magnética

As perdas térmicas nas bobinas também podem causar alterações no valor do campo produzido, se o controlo for feito apenas por corrente. Neste projeto o controlo é feito por corrente mas em função do campo medido por um sensor Hall. O controlo baseado num sensor Hall, com uma resolução adequada, também ajuda a que se obtenham valores de indução magnética de polarização, evolução e deteção estáveis e precisos, em particular nos valores mais baixos da indução magnética de evolução. Se este valor se aproximar do valor de indução magnética externa (incluindo a indução criada por outros equipamentos e o campo terrestre), é necessário compensar este campo. Neste projeto a compensação desta indução é feita através de bobinas auxiliares.

#### 2.8.1.3. Homogeneidade do campo de indução magnética

A homogeneidade do campo depende da variação da indução magnética,  $\Delta B$ , e do valor da indução magnética nominal,  $B_0$ , para um determinado volume. O cálculo pode ser feito através de (2.16) [4].

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_0} \quad (2.16)$$

$B_{max}$  e  $B_{min}$  são as induções magnéticas máxima e mínima, respetivamente, obtidas no volume em estudo.  $B_0$  é ajustado para o valor pretendido no centro do volume do entreferro.

A homogeneidade será tanto maior, quanto menor for a relação em cima apresentada.

Durante a medição a homogeneidade deve ser estável, particularmente no volume da amostra.

#### 2.8.1.4. Tempos de comutação curtos

É importante que os tempos de comutação  $t_{on}$  e  $t_{off}$  sejam muito menores aos tempos de relaxação  $T_1(B_{0D})$  e  $T_1(B_{0E})$ , respetivamente. Se estas comutações forem inferiores a 3 ms já permitem o estudo de muitos sistemas [4].

É possível fazer o princípio de funcionamento de RMN de CCR através de um sistema mecânico, deslocando a amostra entre dois campos estáticos de diferentes níveis de indução magnética. No entanto, para que se atinja estes tempos de comutação e um equipamento de pequenas dimensões é necessário recorrer a sistemas eletrónicos. Sendo este método controlado por uma fonte de alimentação dedicada a este efeito.

# Capítulo 3

## Eletromagneto

Do ponto de vista mecânico, o eletromagneto é o principal elemento do magneto de RMN-CCR. Neste Capítulo apresentam-se as configurações do eletromagneto utilizado, bem como algumas propriedades que afetam esta configuração. Serão abordadas as configurações do núcleo e das bobinas, principais e auxiliares. Ainda neste Capítulo, serão apresentados os resultados das simulações feitas, de forma a analisar esta configuração, auxiliando a sua caracterização, em particular a homogeneidade do campo de indução magnética no espaço de medição.

### 3.1. Introdução

O princípio de RMN baseia-se na existência de uma indução magnética forte estática, indução de Zeeman. De forma a se poder controlar esta indução pode-se utilizar bobinas, percorridas por uma corrente contínua.

O seu núcleo pode ser de ar mas isto implica correntes muito elevadas, levando a perdas por efeito de Joule também elevadas nas bobinas. Isto deve-se à permeabilidade magnética que os materiais apresentam. Quanto maior for a permeabilidade, menor será a resistência à circulação de um fluxo magnético no seu meio, elevando a densidade desse fluxo. O ferro tem uma permeabilidade muito superior à do ar.

Neste trabalho é estudado um eletromagneto que conta com um núcleo ferromagnético. Este terá que ter um entreferro para que seja possível submeter a amostra ao campo gerado. O problema da criação do entreferro no núcleo está associado à diminuição da intensidade da indução magnética e diminuição da homogeneidade do campo nesta zona. Sendo que a técnica, para gerar bons resultados, necessita que o campo seja homogéneo, o entreferro foi reduzido ao máximo, garantindo apenas espaço suficiente para comportar a amostra. Esta redução também permite que se obtenha a mesma indução com um menor valor de corrente.

A diminuição da homogeneidade do campo surge devido ao efeito de franja. Desta forma, para caracterizar o eletromagneto, é importante estudar este efeito.

O eletromagneto é constituído por um núcleo de ferro laminado, por 6 bobinas principais, responsáveis por gerar a indução de Zeeman, e duas auxiliares, que compensam o campo magnético residual. O projeto do eletromagneto foi feito pelo Eng. Pedro Videira e a sua construção foi feita pela Oficel - Electrotecnia, Lda [6].

### 3.2. Núcleo ferromagnético

O núcleo é o componente do eletromagneto que proporciona o suporte às bobinas e o caminho para o fluxo magnético. É formado por chapas de ferro do tipo “E”, com furações para a sua junção, como ilustrado na imagem 3.1.



Figura 3.1 – Chapa de ferro do tipo “E”.

A geometria completa, com as respetivas dimensões, do núcleo ferromagnético está ilustrada na Figura 3.2.

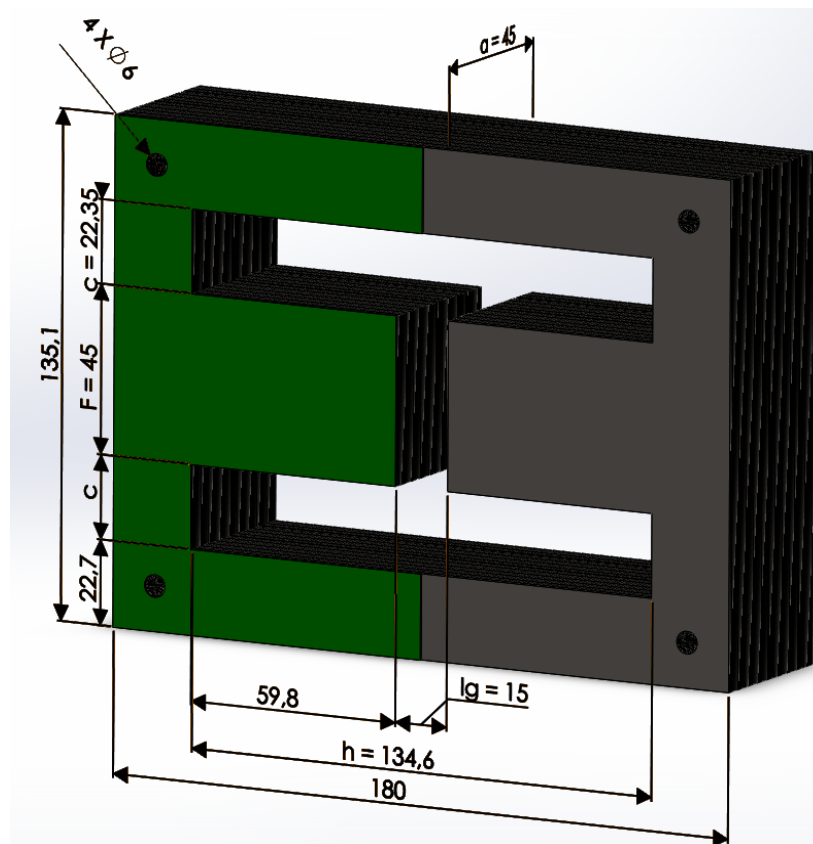
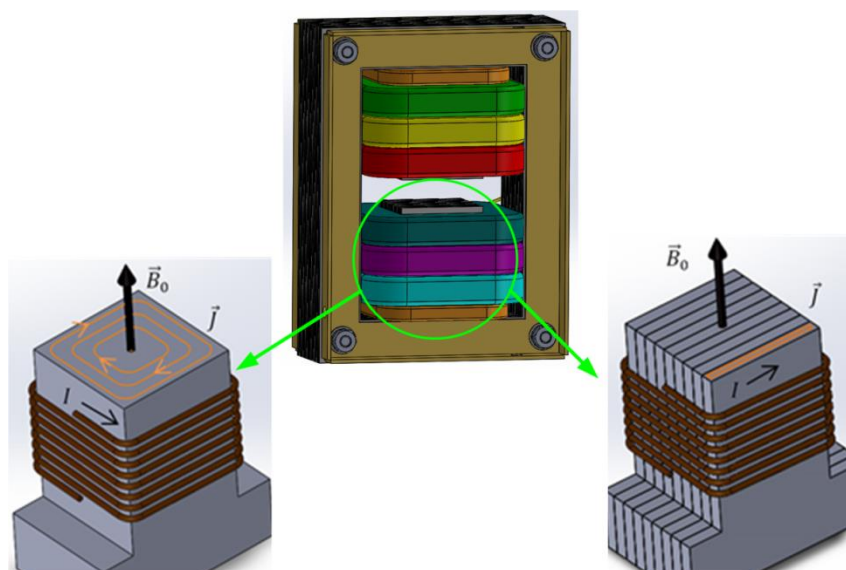


Figura 3.2 – Núcleo ferromagnético (mm).

Associado ao funcionamento de um núcleo existem perdas energéticas, que se dão devido às correntes de Foucault.

### 3.2.1. Correntes de Foucault

Faraday descobriu que um corpo estático sujeito a um campo variante no tempo, ou vice-versa, provoca o aparecimento de uma força eletromotriz. Sendo o corpo condutor, surgem correntes induzidas ou correntes de Foucault. No núcleo ferromagnético estas correntes levam a perdas térmicas por efeito de Joule. De acordo com a lei geral de indução é possível fazer a representação destas correntes no núcleo, ilustradas na Figura 3.3. O facto de estas correntes estarem associadas a uma variação de fluxo torna este fenómeno relevante para este eletromagneto. Mesmo que as bobinas sejam percorridas por corrente contínua, o processo de RMN de CCR requer que o campo seja ciclicamente variado.



a) Correntes em material ferromagnético maciço.

b) Correntes em material ferromagnético laminado.

Figura 3.3 – Representação das correntes de Foucault,  $\vec{J}$ , no núcleo (em corte).

A intensidade destas correntes depende do valor da indução magnética gerado, da resistividade do material e do seu volume. Desta forma, este efeito pode ser mitigado através da redução das dimensões do núcleo, da utilização de um material ferromagnético com uma resistividade mais elevada (o que pode ser conseguido ao fazer a adição de substâncias ao ferro, por exemplo) e através da repartição do circuito por onde estas correntes se fecham (com a laminação do núcleo). Note-se que o sentido da laminação do núcleo é tal que diminua o fluxo disponível por secção, induzindo correntes de menor intensidade. A espessura das chapas, a envernizar, utilizadas é de 0,5 mm.

Estas perdas podem ser quantificadas através da expressão empírica (3.1) [4].

$$P_e = K_e f^2 B_{max}^{n_1} \delta_F^2 V \quad (3.1)$$

$K_e$  está relacionado com o tipo de material,  $B_{max}$  é o valor máximo da indução magnética,  $n_1$  depende do tipo de material ( $1,5 \leq n_1 \leq 2,5$ ),  $V$  representa o volume do material ferromagnético,  $f$  é a frequência da variação da intensidade do campo magnético  $\vec{H}$  e  $\delta_F$  é a espessura da chapa.

### 3.2.2. Efeito de franja

Uma vez que se introduz um entreferro no núcleo também se associa ao seu funcionamento o efeito de franja. Neste trabalho, uma vez que a homogeneidade do campo na zona de medição é importante, o estudo deste efeito ganha particular relevância.

Para analisar a forma como as linhas de fluxo se fecham no núcleo foi feita uma simulação 2D com o programa FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics), ilustrada na

Figura 3.4. Nota: Os parâmetros utilizados na simulação estão apresentados no anexo I.

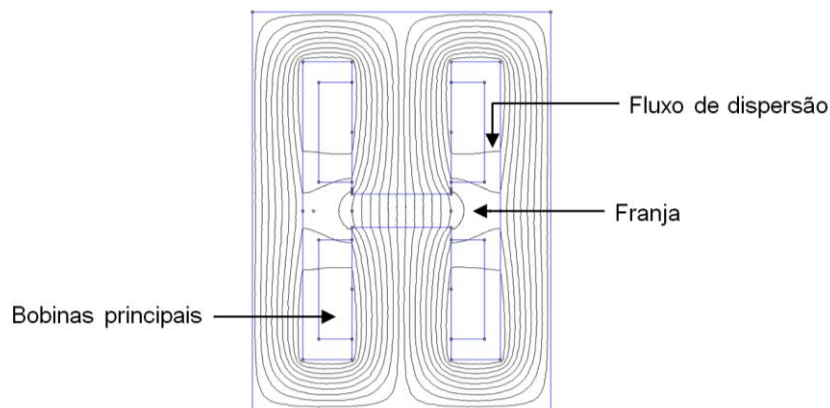


Figura 3.4 – Fluxo magnético no núcleo.

Através da simulação pode-se observar que existe dispersão (“fugas”) de fluxo (linhas de fluxo que não seguem o caminho pretendido do circuito magnético, não contribuindo para o fluxo útil do eletromagneto) e que no entreferro surge um desvio das linhas de campo, fenómeno ao qual se designa efeito de franja. Este desvio ocorre pois a permeabilidade do ar à volta do entreferro é a mesma que no entreferro, sendo as suas relutâncias semelhantes. Isto causa a repartição do fluxo também pela área transversal exterior à secção do entreferro,  $A_f$ . A área  $A_f$  define-se pela área da franja onde a densidade do fluxo é maior que 10% do valor máximo de indução magnética. Na Figura 3.5 ilustra-se esta área e a secção do entreferro, dada pela área  $A_c$ , representadas no plano central do entreferro.

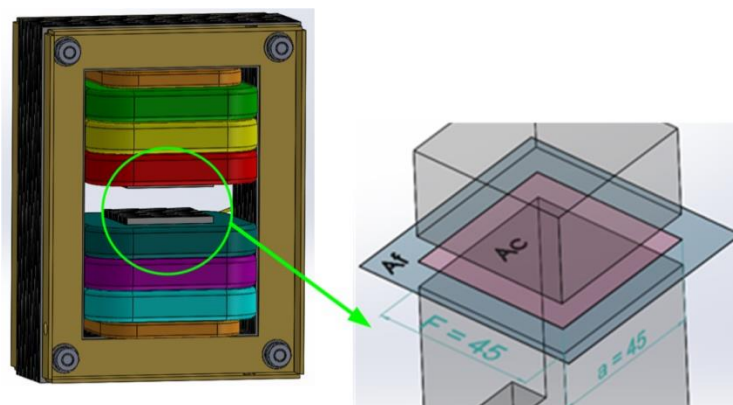


Figura 3.5 – Plano central do entreferro (núcleo em corte).

O aumento do desvio do fluxo conduz ao aumento da área transversal intersetada pelo fluxo, diminuindo a sua densidade, que por sua vez provoca a diminuição da homogeneidade do campo, em particular a partir dos extremos dos polos (efeito estudado no ponto 3.5).

O efeito depende de vários fatores, como a geometria dos polos, a dimensão dos polos, o comprimento do entreferro,  $l_g$ , e a relação entre as permeabilidades do núcleo e do material que está no entreferro. A quantificação deste efeito é feita pelo fator de franja,  $F_f$ . Existem várias fórmulas empíricas para o cálculo deste fator, entre elas uma sugestão feita por

McLyman, apresentada em (3.2) [14].

$$F_f = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln \left( \frac{2h}{l_g} \right) \quad (3.2)$$

$h$  é o comprimento da perna do núcleo, representado na Figura 3.2.

Considerando o circuito magnético equivalente do eletromagneto, e fazendo a sua simplificação, desprezando as relutâncias do ferro e de fugas (apresentado no ponto 3.3.1), é possível determinar o fator de franja para esta configuração do eletromagneto, dado pela expressão (3.3) [4].

$$F_f = 1 + \frac{A_f B_f}{A_c B_g} \quad (3.3)$$

$B_f$  é a indução média na área  $A_f$  e  $B_g$  é a indução média na área  $A_c$ .

Na Figura 3.6 está representada a distribuição da indução magnética genérica ao longo do eixo central do entreferro. Assumindo a simetria dos polos, o varrimento da indução ao longo do eixo  $y$  será igual ao do eixo  $x$ .

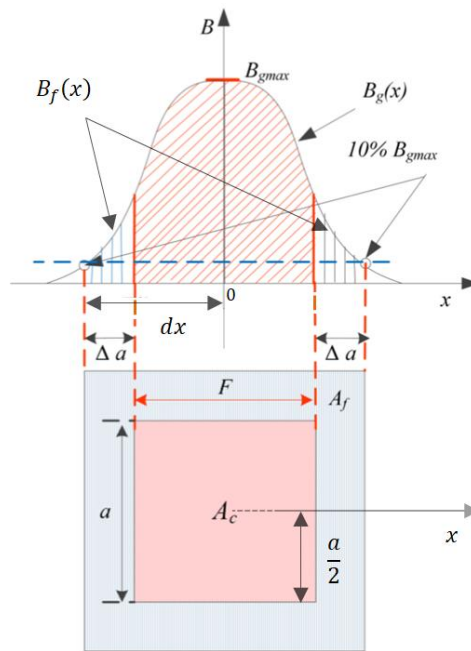


Figura 3.6 – Distribuição típica da indução magnética ao longo do eixo central do entreferro [4].

A área  $A_c$  é constante, dependendo apenas das dimensões do entreferro. Neste caso, é dada por (3.4).

$$A_c = F^2 \quad (3.4)$$

Para o cálculo do fator de franja considerou-se apenas os valores de indução até 10% de  $B_{gmax}$ , sendo este o limite que define a área  $A_f$ . Esta área é calculada através de (3.5).



$$A_f = A_T - A_c \quad (3.5)$$

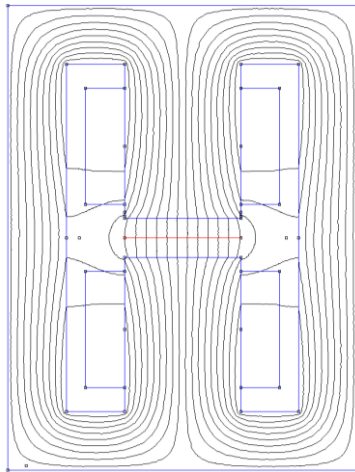
$A_T$  é a área total, dada por (3.6).

$$A_T = (2dx)^2 \quad (3.6)$$

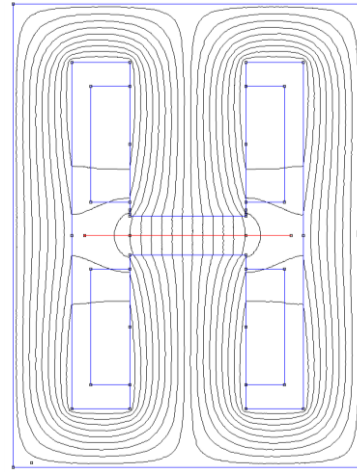
Determinar o valor de  $dx$  depende de onde é colocada a origem do eixo  $x$ . Colocando-o tal como representado na Figura 3.6,  $dx$  é dado por (3.7).

$$dx = x(B_{gmax}) - x(10\% B_{gmax}) \quad (3.7)$$

Os valores de indução médios  $B_g$  e  $B_f$  podem ser calculados pelas áreas tracejadas laranja e azul, respetivamente, ilustradas na Figura 3.6. No entanto, a simulação é feita através do método dos elementos finitos (que consiste na análise de um domínio contínuo por pontos discretos), bem como o ensaio experimental. Assim, para determinar  $B_g$  basta fazer a média aritmética dos valores de indução, retirados no eixo  $x$  (ao longo da distância  $F$  – largura do polo), como ilustrado na Figura 3.7 – a). Para determinar o valor de  $B_f$  pode-se fazer a medição com o comprimento mínimo que garanta que se atinja 10% de  $B_{gmax}$  nos extremos, como ilustrado na Figura 3.7 – b). Neste caso, foi definido um comprimento de 80 mm.



a) Zona de medição de  $B_g$ .



b) Zona de medição de  $B_g + B_f$ .

Figura 3.7 – Simulações realizadas para determinar o efeito de franja (para  $I = 3\text{ A}$ ).

A indução magnética da franja é dada por (3.8) [4].

$$B_f = \frac{\phi_T - \phi_g}{A_f} \quad (3.8)$$

$\phi_g$  é dado por (3.9) e  $\phi_T$  é dado por (3.10) [4].

$$\phi_g = B_g A_c \quad (3.9)$$

$$\phi_T = (B_g + B_f) A_T \quad (3.10)$$

Relembrando que para o fluxo total são apenas considerados os valores de indução  $(B_g + B_f)$  até 10% de  $B_{gmax}$ , independentemente do comprimento de medição definido.

Os resultados de ambas as simulações são apresentados na Figura 3.8.

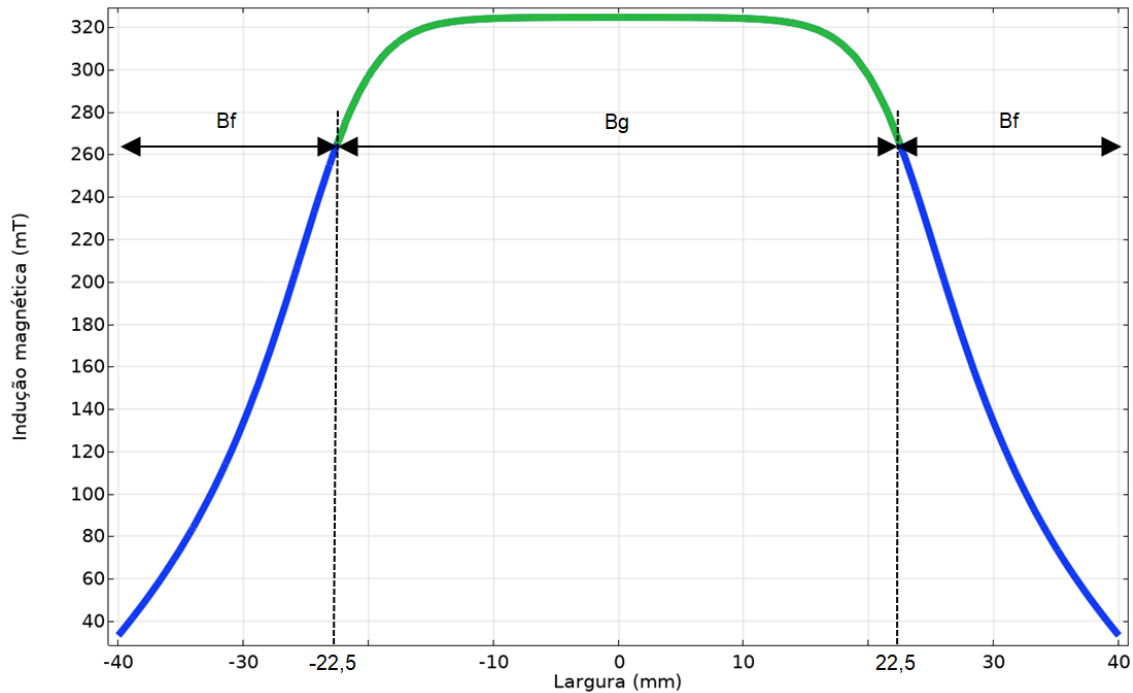


Figura 3.8 – Indução magnética – resultados de simulação.

Pode-se ver que nas extremidades do polo o efeito de franja já ocorre, apesar de ser inferior ao efeito que existe na zona exterior do polo.

Todos os valores calculados para a obtenção do efeito de franja encontram-se numa tabela no anexo II. A indução média no entreferro e franja é de 236,6 mT. Graficamente as induções médias podem ser apresentadas como na Figura 3.9, destacando a relação entre ambas e o valor máximo.

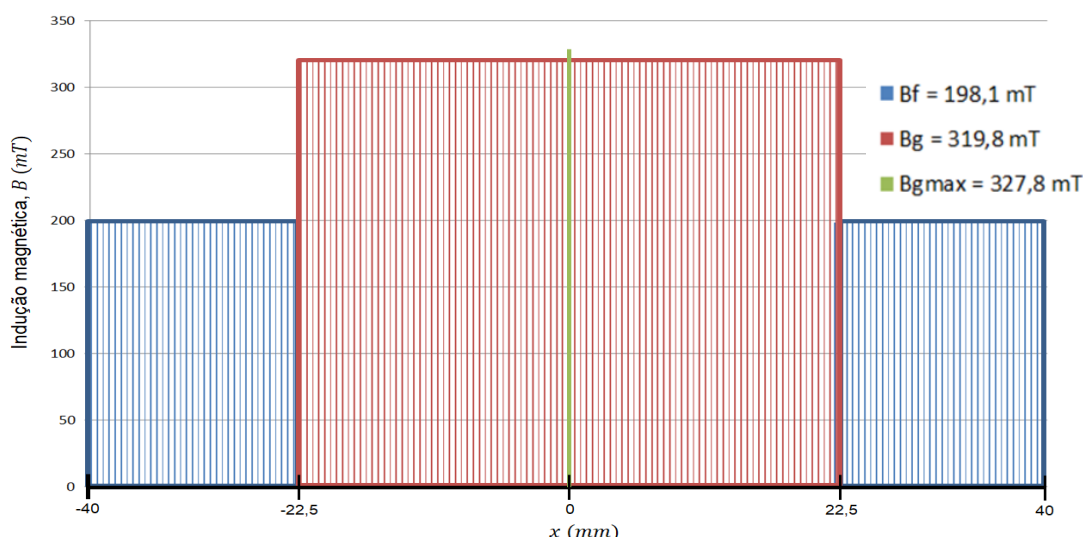


Figura 3.9 – Indução média no eixo central do entreferro (simulação para  $l_g$  de 15 mm).

Com base na expressão (3.3), é possível traçar a evolução do fator de franja em função do comprimento do entreferro e comparar com o fator de franja proposto por McLyman, com o fator de franja obtido para a versão 3 do magneto (“Roque”) e com o resultado obtido pelo Eng. Pedro Videira (“P.V 2.25 cm”). Esta evolução é ilustrada na Figura 3.10.

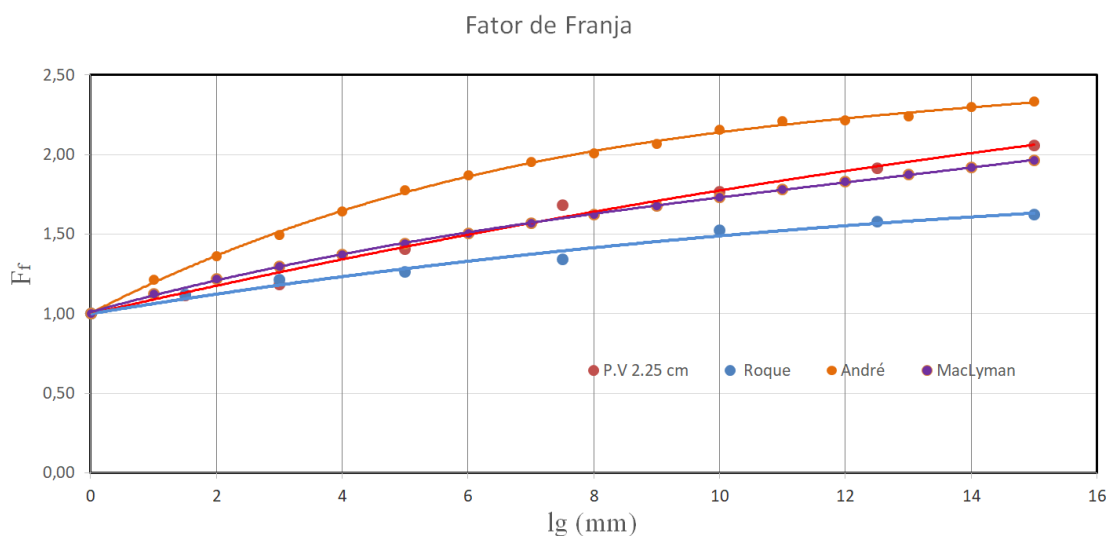


Figura 3.10 – Fator de franja em função do comprimento do entreferro.

O ajuste dos fatores que afetam o efeito de franja compromete outros parâmetros, como o volume do eletromagneto e o campo que este gera. Com as simulações para uma distância entre pernas de 2,25 cm e 5 cm verifica-se uma melhoria do fator de franja com o aumento da distância mas aumenta o espaço necessário. O eletromagneto, criado para a versão 3 do magneto, apresenta um fator de franja melhor mas produz um campo com uma indução magnética máxima inferior à do campo da versão 4.

Uma das formas de reduzir este efeito já foi mencionada anteriormente. Através da redução das correntes de Foucault, reduz-se a indução magnética que se opõe ao sentido do

fluxo. Outra forma, que não é possível aplicar neste trabalho, é repartir o entreferro em várias partes. É também possível mitigar o seu efeito através da aplicação de barreiras de fluxo, com materiais com baixa permeabilidade magnética (como por exemplo, o cobre ou mais eficazmente com a utilização de supercondutores).

Apesar da análise do efeito de franja ter sido feita no centro do entreferro, conclui-se pela simulação que a indução magnética varia no espaço do entreferro e ao seu redor. No ponto 3.5. será feita a análise da homogeneidade do campo. Fazendo a simulação à indução magnética, ilustrada na Figura 3.11, verifica-se também que existe uma concentração de fluxo nos cantos dos polos. Esta irregularidade na distribuição da indução magnética também afeta o efeito de franja.

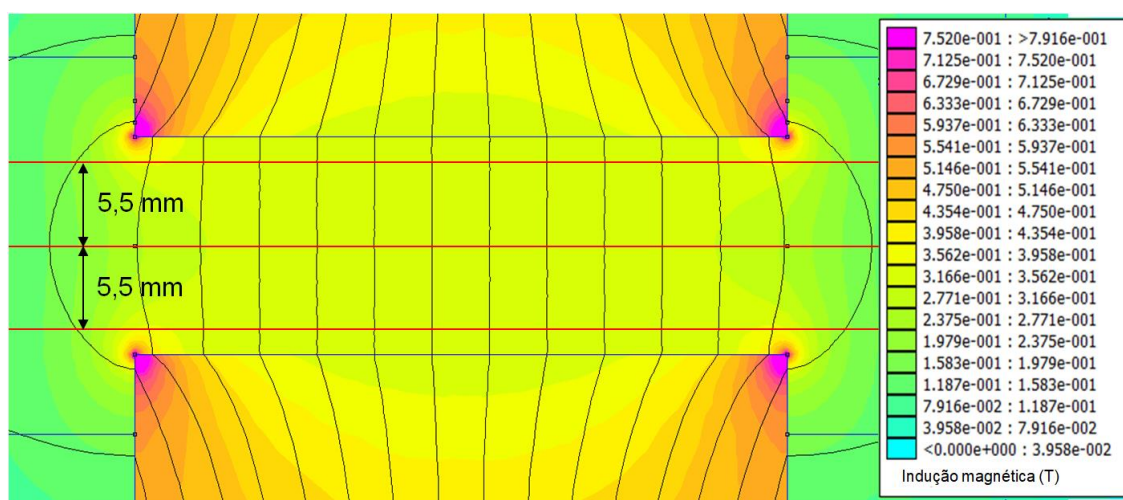


Figura 3.11 – Indução magnética na zona do entreferro e eixos de medição (vermelho).

O gráfico resultante da simulação feita para cotas do eixo  $z$  a uma distância de 5,5 mm do centro do entreferro é ilustrado na Figura 3.12, onde também se pode verificar que existe um aumento da indução magnética nas extremidades do polo. Este aumento será tanto maior quanto mais próximo dos polos for feita a medição.

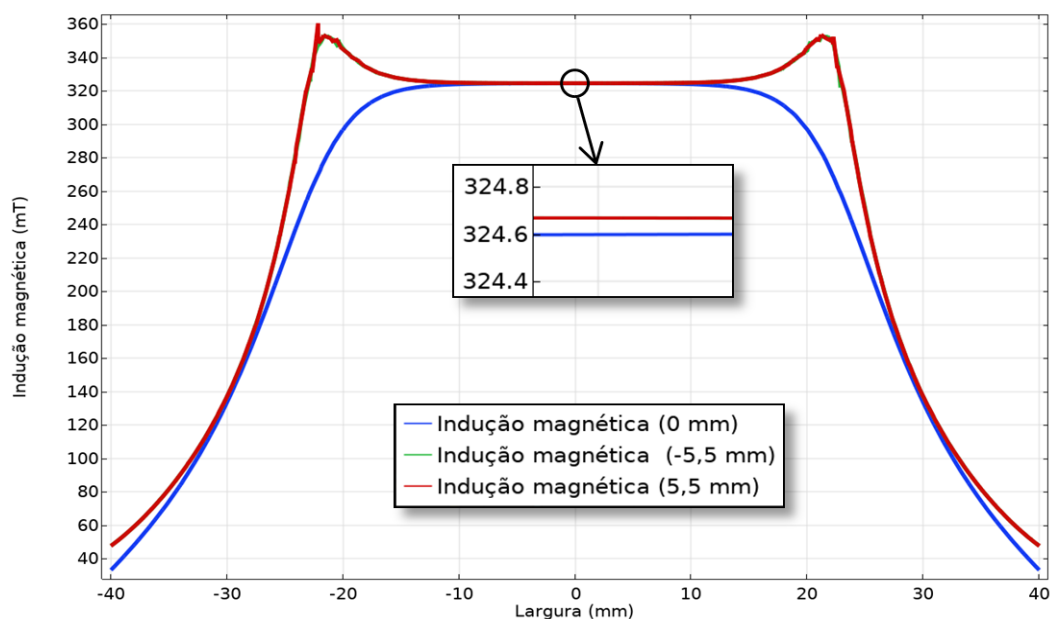


Figura 3.12 – Distribuição da indução em  $B_g + B_f$  para 3 cotas do eixo  $z$  (0; 5,5 e -5,5 mm).

Conclui-se que a redução do entreferro é benéfica para a diminuição do efeito de franja. No entanto, se for demasiado reduzido, é necessário ter em conta a existência do efeito de concentração das linhas de fluxo nos cantos dos polos na homogeneidade do campo.

Verifica-se também que, em planos junto às arestas, a indução magnética é maior do que no plano central. Contudo, a diferença entre os valores obtidos na simulação é muito pequena.

### 3.3. Bobinas principais

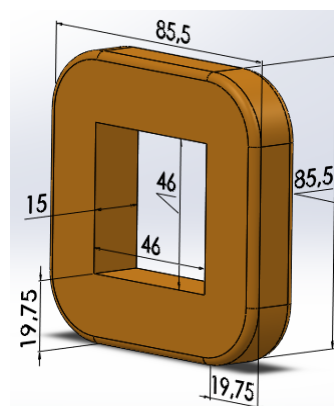
Sendo que se pretende ter um entreferro pequeno, a bobina principal teve que ser dividida em partes que tivessem uma espessura máxima igual ao comprimento do entreferro. Desta forma é possível colocá-las e retirá-las em caso de necessidade de manutenção. A altura das bobinas é limitada pela distância entre pernas (centrais e exteriores) – 22,25 mm. O número de bobinas que é possível colocar é limitado pelo comprimento das pernas centrais do núcleo –  $2 \times 59,8$  mm, considerando que estas devem ficar o mais afastado possível (entre si) para permitir um arrefecimento mais eficiente. A colocação das bobinas deve ser feita dos extremos para o entreferro de forma a que as bobinas fiquem o mais afastadas possível da amostra, para que o campo criado por elas tenha menor interferência no sinal de RF. Neste estudo, esta reparte-se por 6 bobinas constituídas por 218 espiras (cada) de fio de cobre com 0,9 mm de diâmetro, totalizando 1308 espiras ligadas em série, em montagem aditiva [6]. Considera-se montagem aditiva tal ligação que garanta a indução magnética criada por todas as bobinas no mesmo sentido. A polarização das bobinas pode ser verificada de várias formas, por exemplo, pode-se aplicar corrente contínua nas bobinas ligadas em serie e medir a indução no entreferro. Caso as bobinas sejam iguais, o valor de indução medido deverá duplicar. Caso não

se tenha um medidor de indução, sabendo o sentido de enrolamento das bobinas, pode utilizar-se um amperímetro para ver o sentido da corrente induzida na segunda bobina, sendo possível determinar a montagem aditiva, quando o sentido da corrente for tal que o fluxo gerado tenha o mesmo sentido do fluxo gerado pela bobina alimentada. As ligações, com a respetiva polarização, estão representadas no ponto 5.1.1.

Como se ilustra na Figura 3.13 – a), as chapas laminadas do eletromagneto são fixas por chapas quinadas, que servem de suporte aos dados de junção para fazer as ligações do eletromagneto. As dimensões encontram-se representadas na Figura 3.13 – b).



a) Perspetiva do eletromagneto.



b) Dimensões das bobinas principais (em mm).

Figura 3.13 – Eletromagneto com bobinas principais.

De acordo com Altana Tubes, comercializador de fios esmaltados, seguindo o padrão AWG (*American Wire Gauge*), para bobinas compactas instaladas em transformadores de grande porte é recomendável manter a corrente abaixo de  $2,5 \text{ A/mm}^2$ . Em transformadores menores de menores dimensões o valor recomendado é de  $3 \text{ A/mm}^2$ . Em indutores pequenos, contendo poucas camadas de fio, a corrente pode ser elevada até  $6 \text{ A/mm}^2$  [15]. A corrente máxima não depende apenas das características do cobre mas também do isolamento. Para garantir uma margem de segurança, para  $2,5 \text{ A/mm}^2$ , a corrente máxima nas bobinas principais é de 3 A, de acordo com a expressão (3.11).

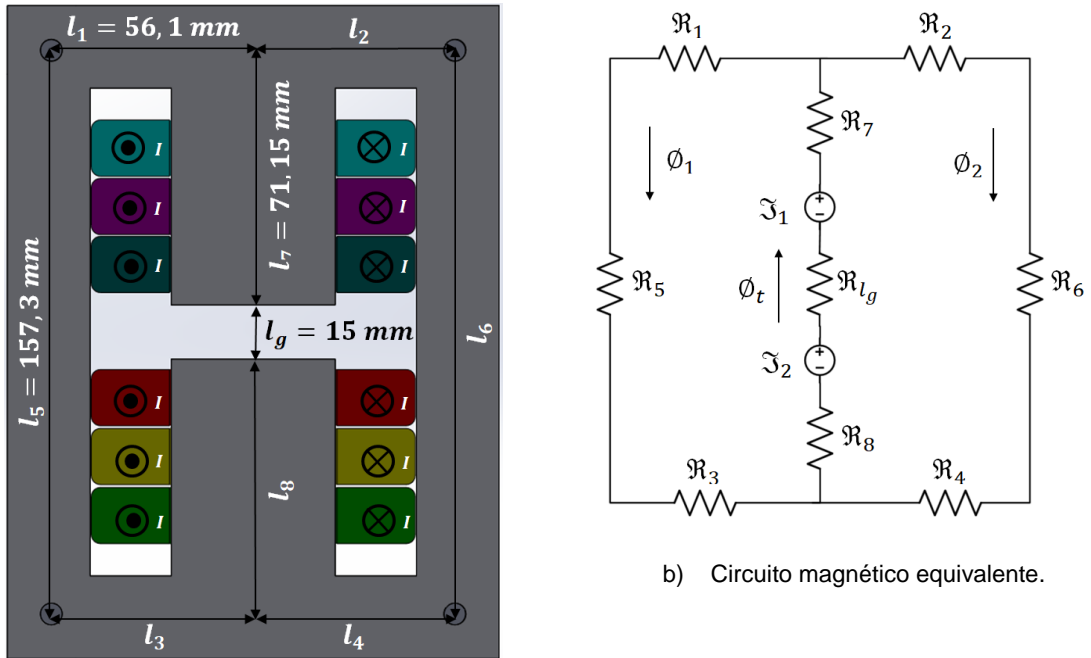
$$I_{max} = \pi r^2 \times 2,5 \quad (3.11)$$

$r$  é o raio do fio.

O comprimento total das 6 bobinas é 353,2 m [19]. Sendo a resistividade do cobre  $1,68 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$  [16], a resistência total é de, aproximadamente,  $9,33 \Omega$ . A resistência pode ser medida diretamente com um multímetro, através do método volt-amperimétrico ou através da medição da impedância em corrente alternada. A sua medição está descrita do ponto 6.1.1. Considerando o valor teórico da resistência, determina-se que a potência máxima dissipada por efeito de Joule nas bobinas principais é de, aproximadamente, 84 W.

### 3.3.1. Relação entre corrente e indução magnética

A relação entre a corrente e a indução magnética pode ser obtida através do circuito magnético equivalente do núcleo, representado na Figura 3.14, com as distâncias médias do percurso do fluxo.



a) Núcleo em corte.

Figura 3.14 – Circuito magnético em corte e respetivo circuito equivalente.

Este circuito equivalente é obtido desprezando os fluxos de fugas e de franja. O efeito das bobinas de compensação também não é considerado. Fazendo a sua simplificação obtém-se o circuito ilustrado na Figura 3.15.

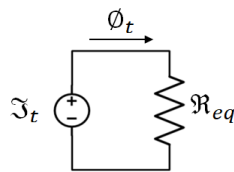


Figura 3.15 – Circuito magnético equivalente simplificado.

A força magneto motriz das 6 bobinas é dada por (3.12).

$$\mathfrak{F}_t = \mathfrak{F}_1 + \mathfrak{F}_2 = NI = \mathfrak{R}_{eq} \Phi_t \quad (3.12)$$

$N$  é o número de espiras,  $\Phi_t$  é o fluxo total (dado por (3.13)) e  $\mathfrak{R}_{eq}$  é a relutância equivalente do circuito (dada por (3.16)).

$$\Phi_t = \Phi_g = B_g A_c \quad (3.13)$$

$$NI = \mathfrak{R}_{eq} B_g A_c \quad (3.14)$$

$$B_g = \frac{N}{\mathfrak{R}_{eq} A_c} I \quad (3.15)$$

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_{eqP} + \mathfrak{R}_7 + \mathfrak{R}_8 + \mathfrak{R}_{lg} = 5917623,5 \text{ H}^{-1} \quad (3.16)$$

$\mathfrak{R}_{eqP}$  é a resistência equivalente do paralelo, dada por (3.17).

$$\mathfrak{R}_{eqP} = \frac{\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_5 + \mathfrak{R}_3}{2} \quad (3.17)$$

A expressão (3.17) é válida pois  $\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{R}_2 = \mathfrak{R}_3 = \mathfrak{R}_4$  e  $\mathfrak{R}_5 = \mathfrak{R}_6$ .

Cada relutância é calculada a partir da expressão (3.18).

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (3.18)$$

$\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7}$ ),  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa do material (tratando-se de um ferro vulgar, no caso foi considerado 7000),  $l$  é o comprimento médio do percurso (Figura 3.14 – a)) e  $A$  é a secção correspondente ao percurso.

Então, a relação entre a corrente e a indução magnética é dada por (3.19).

$$B_g = 0,109I \quad (3.19)$$

Através de (3.11) e (3.19) obtém-se uma indução magnética máxima de 0,327 T.

### 3.3.2. Coeficiente de autoindução da bobina

A variação da corrente altera a indução magnética, o que induz uma tensão,  $v_L$ , aos terminais da bobina, polarizada inversamente à tensão que origina a corrente, como dado pela expressão (3.20).

$$v_L = -L \frac{di}{dt} \quad (3.20)$$

$L$  é o coeficiente de autoindução,  $i$  a corrente e  $t$  o tempo.

Uma vez que se pretende fazer um controlo de corrente através da fonte de alimentação, dimensionada para a alimentação do magneto, a indutância é um parâmetro importante pois



afeta a variação da corrente no tempo. De acordo com a expressão (3.20), quanto maior for o coeficiente de autoindução, maior terá que ser a tensão aplicada aos terminais da bobina, para a variação da corrente pretendida.

Para além disso, é importante conhecer o valor das indutâncias das bobinas, montadas no núcleo ferromagnético, para caracterizar o eletromagneto. Isto pois a indutância varia com as características do núcleo, nomeadamente com o entreferro criado. Através de (3.14) e (3.21) obtém-se (3.22) [17].

$$\psi = N\phi_t \quad (3.21)$$

$\psi$  é definido por fluxo concatenado.

$$\psi = \frac{N^2 I}{\mathfrak{R}_{eq}} \quad (3.22)$$

O número de espiras relaciona-se com o coeficiente de autoindução através de (3.23), em circuitos magnéticos com uma relação linear entre a indução magnética e a corrente (o caso deste eletromagneto) [18].

$$L = \frac{\psi}{I} \quad (3.23)$$

De (3.23) e com a simulação do fluxo total feita para o efeito de franja (com os valores apresentados no anexo II) pode-se calcular a indutância total, tendo sido obtida uma indutância de 659,35 mH.

Através de (3.22) e (3.23) obtém-se (3.24), de onde se pode concluir que a diminuição do entreferro aumenta a indutância do eletromagneto.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{eq}} \quad (3.24)$$

A medição do coeficiente de autoindução pode ser feita através do método direto, do método de corrente alternada e do método de ressonância. Os resultados obtidos experimentalmente são apresentados no ponto 6.1.1.

#### 3.3.2.1 Método direto

O método mais simples de medição é o método direto, sendo que esta pode ser feita diretamente com um medidor de indutâncias ligado aos terminais da bobina, como o medidor R/L/C Promax MZ-505, por exemplo.

#### 3.3.2.2. Método indireto - corrente alternada

Para determinar a indutância através da aplicação de corrente alternada na bobina, basta

fazer a ligação ilustrada na Figura 3.16 e medir a tensão, a corrente e a potência, por exemplo com um wattímetro digital.

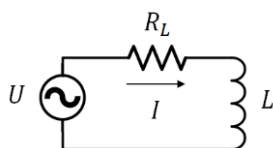


Figura 3.16 – Circuito RL.

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{P}{UI} \right) \quad (3.25)$$

$$R_L = \frac{U}{I} \cos \varphi \quad (3.26)$$

$$X_L = \frac{U}{I} \sin \varphi \quad (3.27)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (3.28)$$

$\varphi$  é o desfasamento entre a tensão e a corrente,  $P$  é a potência,  $R_L$  é a resistência da bobina,  $X_L$  é a reatância indutiva e  $f$  é a frequência.

### 3.3.2.3 Método indireto - ressonância

Levando um circuito à sua condição de ressonância, a sua impedância varia, fazendo com que o seu comportamento se altere. No caso dos circuitos RLC serie em ressonância, a sua impedância é mínima pois a impedância indutiva e capacitiva igualam-se, anulando-se. Desta condição retira-se a frequência de ressonância do circuito,  $f_0$ , dada por (3.29).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.29)$$

Executando a montagem representada na Figura 3.17 e levando o circuito à ressonância, é possível determinar o valor da indutância, caso se conheça o valor do condensador, através de (3.30). O CH1 e o CH2 são entradas em tensão para o osciloscópio mostrar a tensão de entrada do circuito e uma imagem da corrente no circuito, respetivamente.

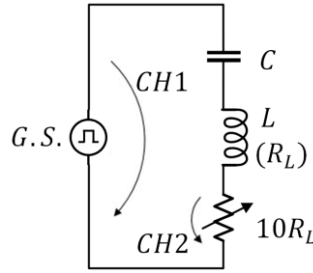


Figura 3.17 – Circuito RLC série.

$$L = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{2\pi f_0} \right)^2 \quad (3.30)$$

Empiricamente, define-se que resistência variável deve ser ajustada para que seja dez vezes superior a  $R_L$ , de forma a que esta possa ser desprezada.

No modo X-Y do osciloscópio obtém-se a composição gráfica dos dois sinais periódicos, um na vertical e o outro na horizontal. O que este modo do osciloscópio faz é, em cada instante, marca a interseção entre as linhas de projeção vertical e horizontal, como ilustrado na Figura 3.18.

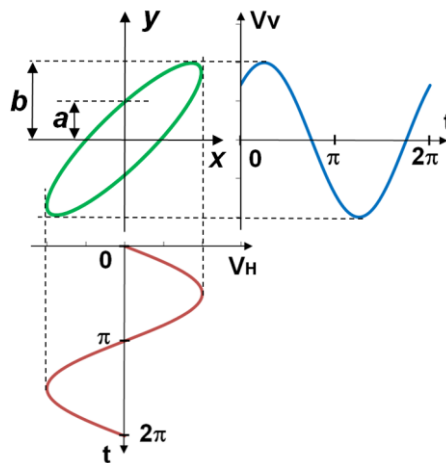


Figura 3.18 – Composição perpendicular de ambos os sinais [19].

A composição perpendicular de ambos os sinais é designada por Figura de Lissajous. Esta figura é afetada pela relação entre a frequência dos sinais e pela desfasagem. Se a relação de frequência for de 1:1, as Figuras de Lissajous serão elipses, cujo formato e inclinação dependerão do desfasamento entre os dois sinais, sendo  $\sin \varphi = a/b$ . Quando os sinais estiverem em fase a elipse torna-se numa reta, o que significa que se está na presença de um circuito com carácter resistivo, logo sabe-se a frequência de ressonância.

### 3.3.3. Coeficiente de dispersão

O fluxo de dispersão surge devido aos aspetos construtivos dos enrolamentos e do

núcleo. Este efeito também se verifica com apenas um enrolamento. Parte do fluxo gerado pela bobina não se fecha pelo núcleo. Isto representa uma impedância indutiva adicional, que pode ser vista em série com cada enrolamento.

Esta dispersão será tanto maior quanto menores forem as dimensões do núcleo, nomeadamente a distância entre as bobinas e as pernas exteriores.

Pode-se determinar esta indutância através de (3.23), sendo que o fluxo de dispersão será a diferença entre o fluxo gerado pelas bobinas e o fluxo total no entreferro e franja, tendo sido obtida uma indutância de dispersão de 197,73 mH, representando 30% da indutância total.

A medição da indutância de dispersão pode ser feita através dos mesmos métodos de medição de indutâncias (apresentadas no ponto 3.3.2.), mas com as 6 bobinas ligadas de forma subtrativa, isto é, 3 bobinas com uma polarização e as outras 3 com a polarização inversa. Se não houvesse indutância de dispersão, o resultado da medição seria nulo. Os resultados obtidos experimentalmente são apresentados no ponto 6.1.1.

### 3.4. Bobinas auxiliares

De forma a compensar o magnetismo remanescente, indução magnética que se mantém após se anular a corrente, é necessário aplicar uma corrente nas bobinas auxiliares, de forma a criar um campo que anule o remanescente.

Estas bobinas têm 430 espiras, com diâmetro de 0,25 mm, e suportam 60 mA em regime permanente [4]. Estas bobinas estão ilustradas na Figura 3.19 (a laranja), juntamente com o eletromagneto completo.

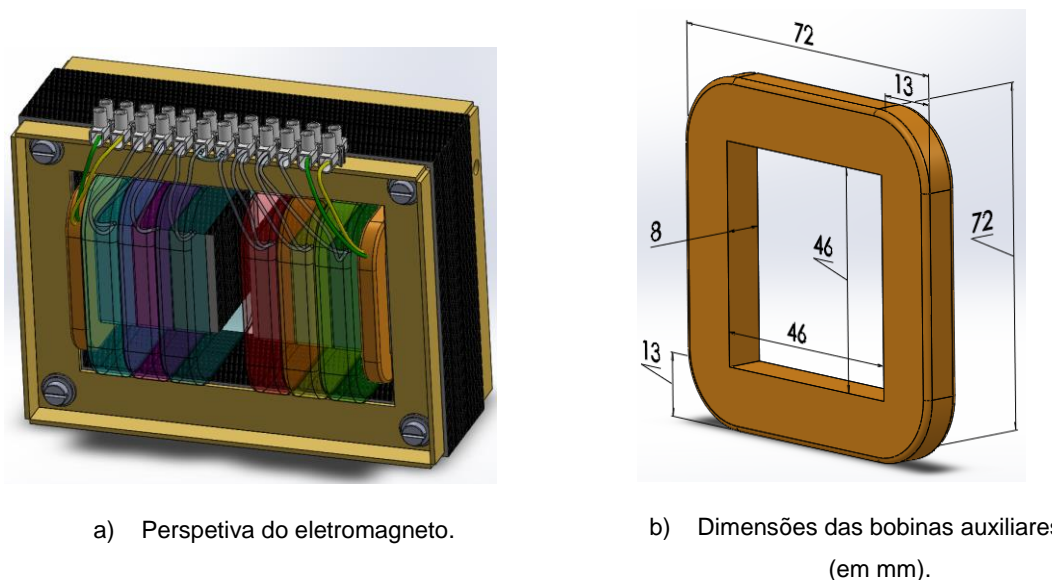


Figura 3.19 – Eletromagneto com bobinas principais e auxiliares.

Numa aplicação com campos pequenos também pode ser relevante compensar o campo magnético terrestre, 43,7  $\mu\text{T}$  nas Praias do Sado, Setúbal [20].

O comprimento total das duas bobinas é aproximadamente 203 m, apresentando uma resistência de 69,5  $\Omega$ . Para 60 mA a potência dissipada por estas bobinas será de 0,25 W.

### 3.5. Homogeneidade do campo de indução magnética no entreferro

Como visto no ponto 2.8.1, a homogeneidade do campo é um dos requisitos para que a técnica de RMN-CCR funcione. Nesse sentido, neste ponto será feita a análise da homogeneidade do campo, gerado pela configuração do núcleo apresentada anteriormente, para a corrente máxima de 3 A.

O volume onde é mais importante que se verifique a homogeneidade do campo é na zona onde a amostra é inserida, sendo este volume,  $V_a$ , representado por (3.31) e ilustrado na Figura 3.20 – a).

$$V_a = b \times b \times c = 15 \times 5 \times 11 \text{ mm}^3 = 0,825 \text{ cm}^3 \quad (3.31)$$

Também para caracterizar a homogeneidade do volume correspondente à área total do entreferro, define-se o volume  $V_c$  por (3.32), ilustrado na Figura 3.20 – b).

$$V_c = F \times a \times c = 45 \times 45 \times 11 \text{ mm}^3 = 22,275 \text{ cm}^3 \quad (3.32)$$

Na Figura 3.20 – c) está ilustrado o volume correspondente à área do entreferro e franja,  $V_f$ , dado por (3.33).

$$V_f = (a + \Delta a) \times (F + \Delta a) \times c = 62,5 \times 62,5 \times 11 \text{ mm}^3 \approx 42,97 \text{ cm}^3 \quad (3.33)$$

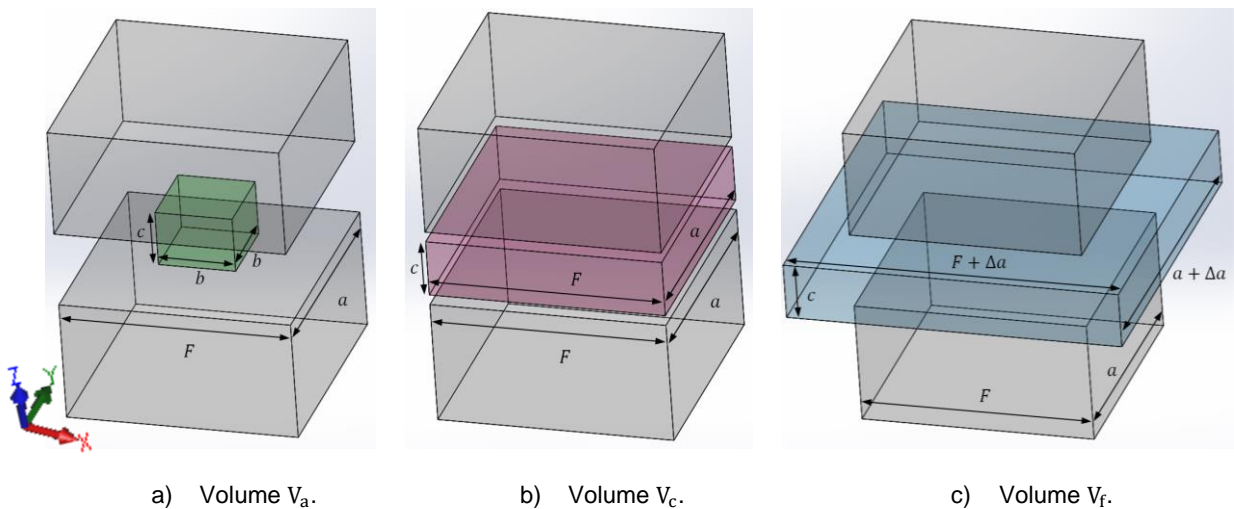


Figura 3.20 – Volumes para a análise da homogeneidade no entreferro (núcleo em corte).

Para determinar a homogeneidade nos volumes, considerou-se fazer a análise através de

3 superfícies, retiradas do plano  $x,y$ , que representam as áreas superior, central e inferior dos volumes (com  $z = 5,5$  mm,  $z = 0$  mm,  $z = -5,5$  mm, respetivamente). Durante as medições, para a origem do referencial foi considerado o ponto central do entreferro. Estas superfícies encontram-se ilustradas na Figura 3.21.

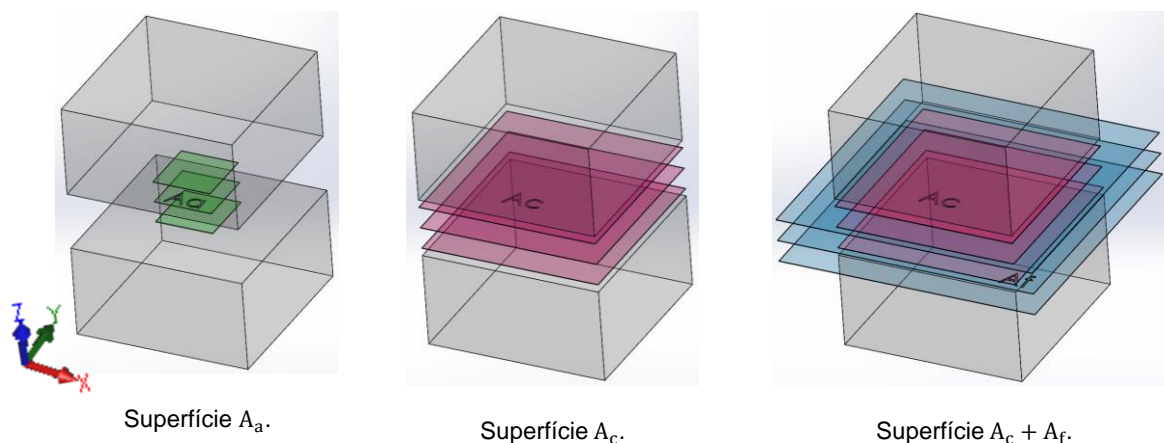


Figura 3.21 – Superfícies  $A_a$ ,  $A_c$  e  $A_c + A_f$  no entreferro (núcleo em corte).

A distribuição do campo por cada uma das camadas pode ser simulada com o auxílio do *software* COMSOL 3D. Experimentalmente, a medição da distribuição do campo é feita através de um gaussímetro, com a sonda presa a uma mesa de 3 eixos.

A representação da distribuição do campo, por cada uma das 3 camadas, pode ser feita através de curvas de nível. De forma a permitir uma melhor visualização, é possível fazer a representação a 3 dimensões. Nas Figuras 3.22 a 3.27, representam-se as distribuições do campo por camada.



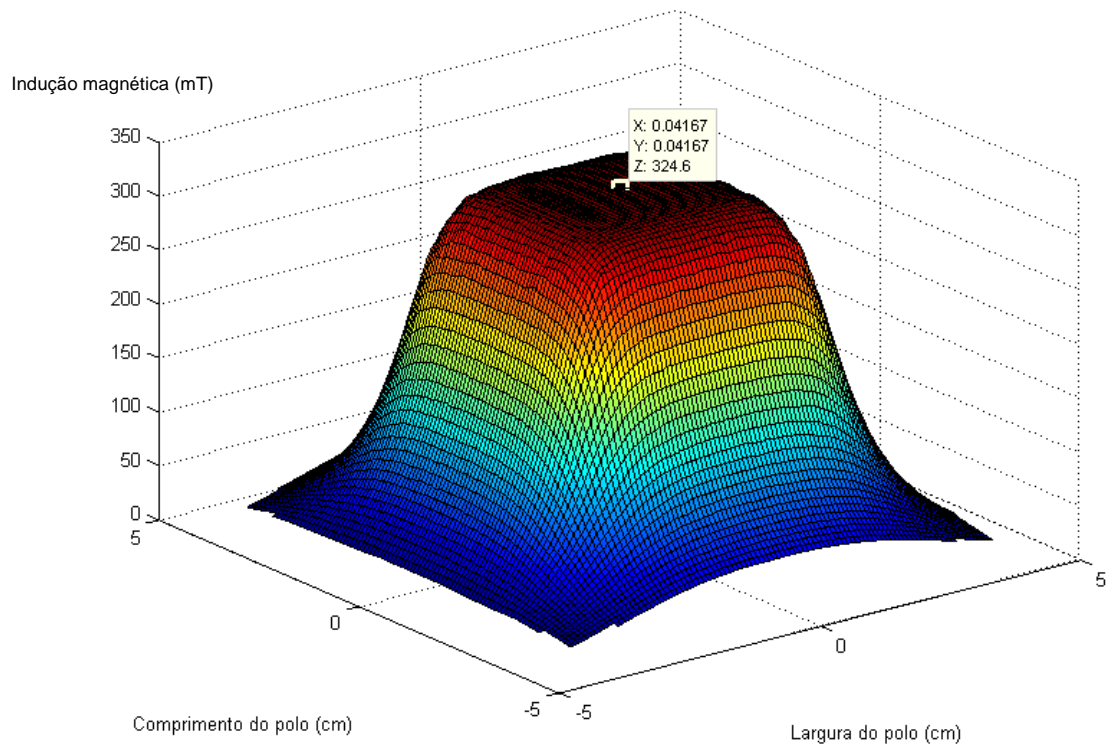


Figura 3.22 – Distribuição da indução magnética na camada  $z = 0$  mm – resultado de simulação.

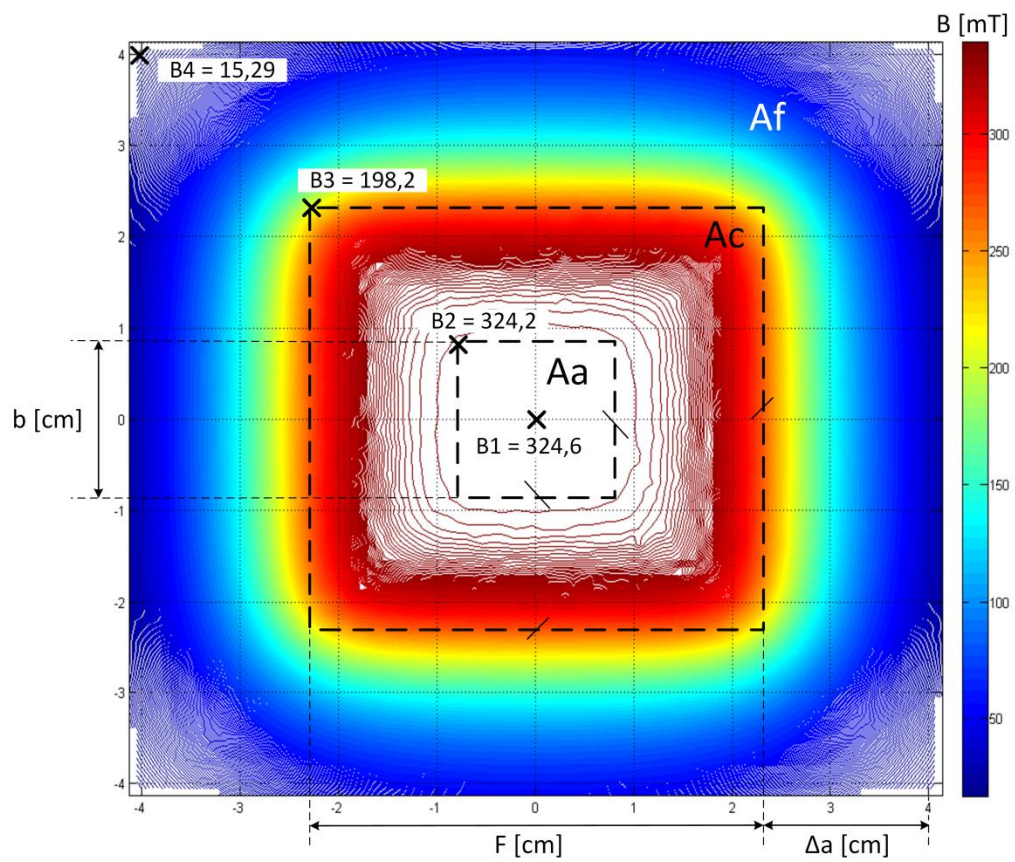


Figura 3.23 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada  $z = 0$  mm [mT] – resultado de simulação.

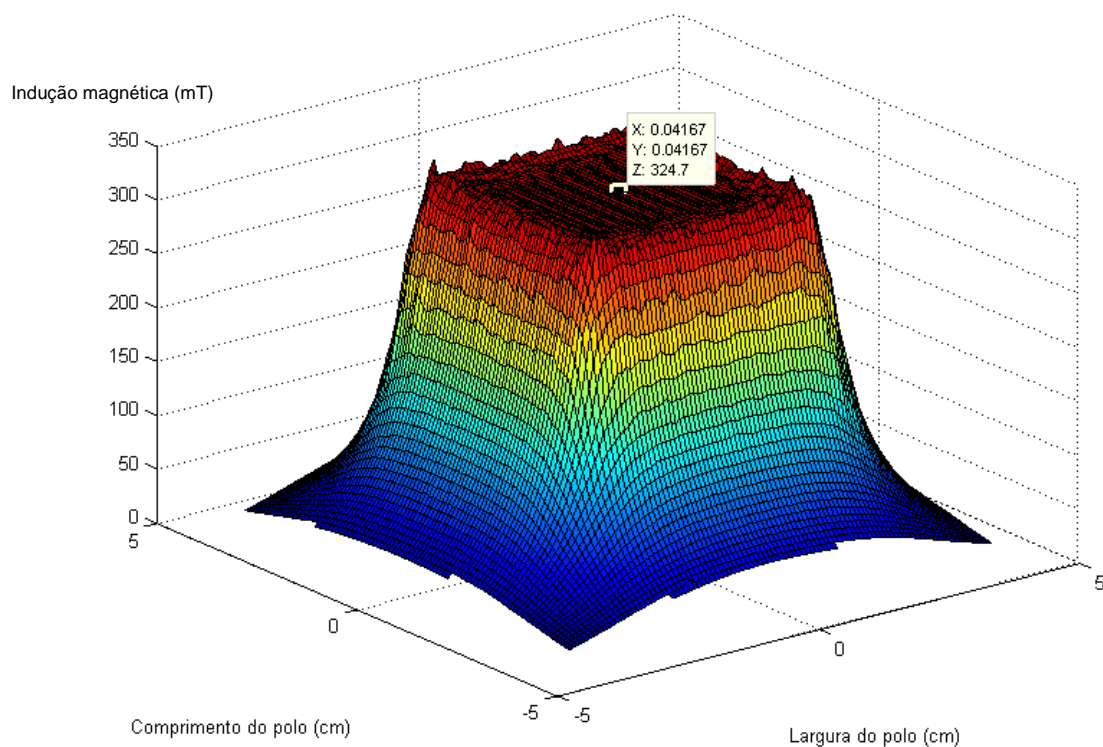


Figura 3.24 – Distribuição da indução magnética na camada  $z = 5,5$  mm – resultado de simulação.

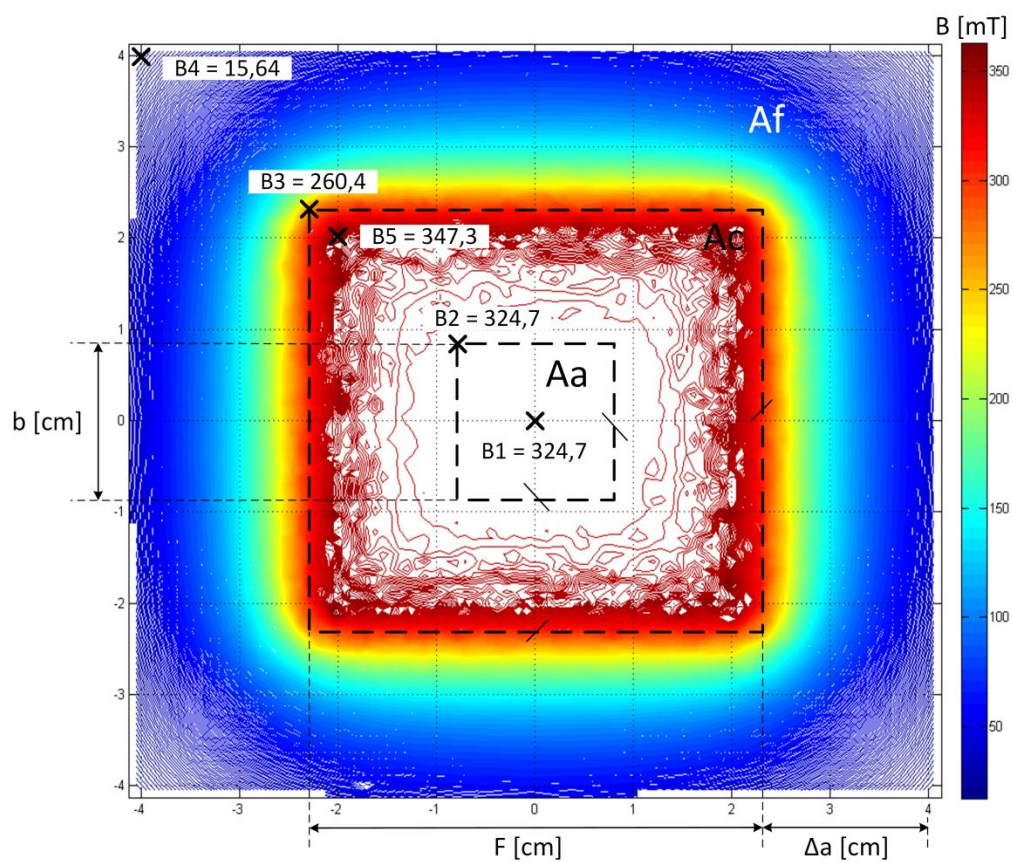


Figura 3.25 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada  $z = 5,5$  mm [mT] – resultado de simulação.



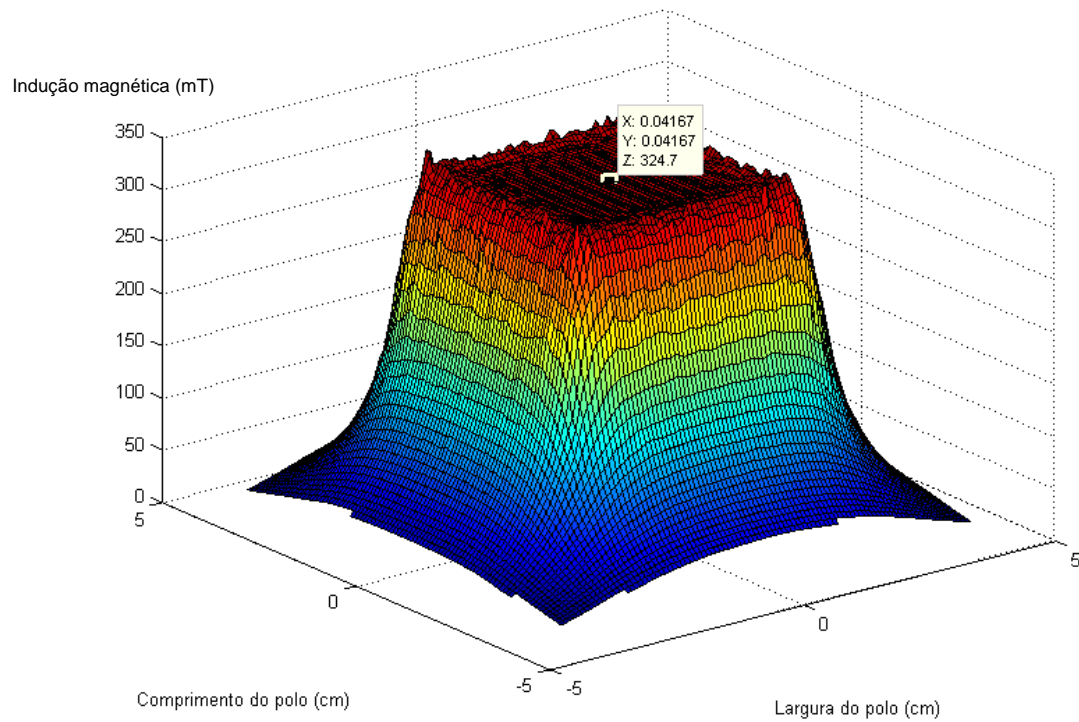


Figura 3.26 – Distribuição da indução magnética na camada  $z = -5,5$  mm – resultado de simulação.

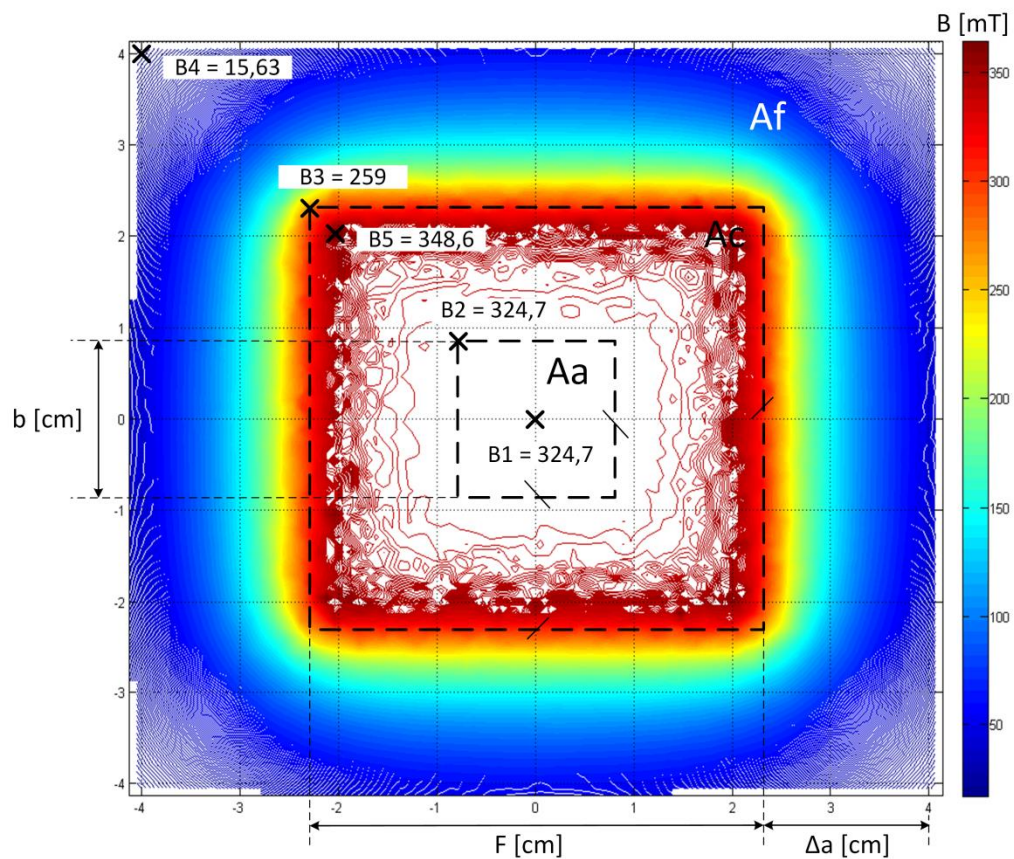


Figura 3.27 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada  $z = -5,5$  mm [mT] – resultado de simulação.

Das curvas de nível pode-se concluir que a zona da amostra tem um campo praticamente uniforme. A área do polo começa a ter algumas linhas, que representam diferenças nos valores de indução, o que significa uma redução da homogeneidade mas é na área da franja onde a redução da homogeneidade se acentua.

Dada a simetria do núcleo e comprovada nos resultados obtidos, basta analisar  $\frac{1}{4}$  da camada. Assim, apenas foram registados os pontos máximos e mínimos de cada área em  $\frac{1}{4}$  da camada, de onde se pode calcular a homogeneidade por superfície e volume (valores apresentados na tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Valores máximos e mínimos por superfície e área.

<b>B<sub>nominal</sub> [mT]:</b>			
<b>Cota z [mm]</b>	<b>Área</b>	<b>Maior [mT]</b>	<b>Menor [mT]</b>
<b>-5,5</b>	<b>Polo + franja</b>	348,6	15,63
	<b>Polo</b>	348,6	259
	<b>Amostra</b>	324,7	324,7
<b>0</b>	<b>Polo + franja</b>	324,6	15,29
	<b>Polo</b>	324,2	198,2
	<b>Amostra</b>	324,6	324,2
<b>5,5</b>	<b>Polo + franja</b>	347,3	15,64
	<b>Polo</b>	347,3	260,4
	<b>Amostra</b>	324,7	324,7

O  $B_{nominal}$  obtido através da simulação é ligeiramente inferior ( $\sim 0,7\%$ ) ao valor calculado analiticamente, o que é aceitável considerando as aproximações feitas. Na camada central do entreferro ( $z = 0$  mm) a indução máxima é igual ao valor nominal. Este valor mantém-se praticamente constante em todo o volume da amostra. Isto deixa de ser válido nos restantes volumes devido à concentração de fluxo nas extremidades dos polos.

Da tabela 3.1 pode-se quantificar as conclusões já tiradas para as curvas de níveis, destacando-se a homogeneidade nula, o que corresponde a um campo totalmente uniforme. Também se verifica que, na área do polo, o campo é mais uniforme nas cotas  $z = 5,5$  mm e  $z = -5,5$  mm. Isto acontece pois a concentração do fluxo nas extremidades do polo compensa o efeito de franja.

A homogeneidade nos volumes  $V_a$  e  $V_c$  está quantificada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Homogeneidade no volume central do entreferro.

<b>B nominal = 324,6 mT</b>	
<b>Volume</b>	<b><math>\Delta B/B_0</math> [%]</b>
$V_a$	0,15
$V_c$	46,33

# Capítulo 4

## Constituição do magneto

Neste Capítulo são apresentados os restantes componentes do magneto de RMN de CCR. Para além do eletromagneto, o magneto é constituído por: um circuito de prova (RF); um sensor para a indução magnética de Zeeman; um sistema de aquecimento e monitorização da temperatura (da amostra e do eletromagneto); um sistema de arrefecimento; Sinalética; um sistema de rotação da amostra.

## 4.1. Circuito de prova

Tal como referido no princípio de funcionamento do processo de RMN, Capítulo 2, é necessário criar uma indução magnética de RF, na frequência de Larmor. Para isso é utilizada uma bobina de RF ligada em série com um condensador variável.

Este circuito interliga o emissor e o recetor, pelo que deve também garantir o devido acoplamento entre ambos. A interligação é feita por meio de quatro díodos, que estão, dois a dois, em antiparalelo (trata-se de um sinal alternado) e por um cabo com um comprimento de  $\lambda/4$  ( $\lambda$  é o comprimento de onda). Na seleção dos díodos, deve-se ter em consideração a frequência de comutação (metade do período correspondente à frequência de Larmor pretendida). Os díodos utilizados são 1N4148PH, com um tempo de recuperação reversa de 4 ns. O antiparalelo dos díodos (1//2 da Figura 4.1) encontra-se no interior do magneto. Fora do magneto existe um cabo que liga o terminal  $R_X$  ao recetor, estando o cabo ligado à massa através dos outros díodos em antiparalelo (3//4 da Figura 4.1). Este cabo tem um comprimento de  $\lambda/4$ , o que garante que, durante a emissão, a sua impedância elevada faz com que o sinal atravesse apenas para o circuito ressonante. A impedância elevada é garantida pelo conjunto do cabo e dos díodos (3//4). Durante a receção, o sinal detetado pela bobina tem uma amplitude baixa, insuficiente para fazer os díodos entrarem em condução, pelo que o emissor fica isolado e o cabo já não se comporta como uma impedância infinita.

Para a frequência de 8,862 MHz, o comprimento do cabo deverá ser 8,46 m, de acordo com (4.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.1)$$

$c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $\sim 300.000$  km/s).

Sendo que o emissor e o recetor estão colocados fora do magneto, o circuito de prova no magneto tem que ter os terminais para fazer as respetivas ligações. Na Figura 4.1 representa-se o esquema deste circuito.

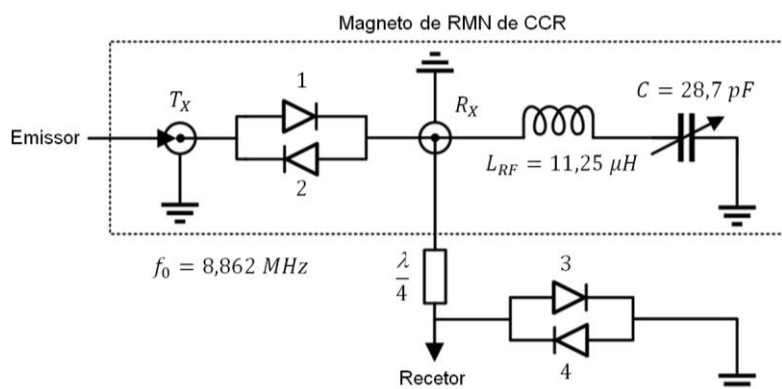


Figura 4.1 – Circuito de prova no magneto.

O terminal  $T_X$  recebe o sinal do emissor e o terminal  $R_X$  envia o sinal para o recetor. Estes terminais são conectores BNC machos de montagem em painel (RS-PRO – 546-4487).

Um requisito para a configuração deste circuito é que a bobina tem que estar na zona onde é inserida a amostra. Sendo que essa zona é o entreferro, as dimensões são um fator crítico no dimensionamento do magneto. Para tal, a bobina é colocada à volta de um tubo de vidro com um diâmetro exterior de 9,1 mm (dimensões explicadas no ponto 5.1.2). Os restantes componentes do circuito são colocados numa caixa blindada para atenuar o ruído. Na Figura 4.2 ilustra-se o funcionamento do circuito de prova durante a emissão.

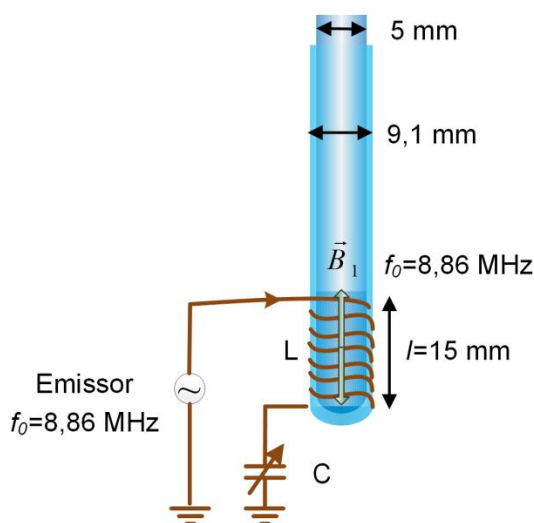


Figura 4.2 – Funcionamento do circuito de prova durante a emissão [4].

O sinal emitido para o circuito de RF tem uma amplitude de 50 V. O sinal de resposta tem uma amplitude na ordem dos  $\mu\text{V}$ .

#### 4.1.1. Dimensionamento do circuito de deteção

Apesar de este eletromagneto ter a capacidade de produzir uma indução máxima de 0,319 T (medido experimentalmente, apresentado no ponto 6.2), o dimensionamento da bobina de RF foi feito para o valor máximo de indução da versão anterior do eletromagneto (0,2081 T), o que corresponde a uma frequência de Larmor de 8,862 MHz. O dimensionamento foi feito desta forma pois a fonte de alimentação ainda não foi adaptada para o novo magneto.

Existem várias formas de ajustar este eletromagneto à indução pretendida. Através do ajuste de corrente ou removendo 2 das 6 bobinas (de forma simétrica). Através do ensaio com 4 bobinas, ponto 6.3, verifica-se que a indução máxima (para 3 A) é de 0,214 T. Esta solução permite ganhar espaço entre as bobinas, elevando a eficiência de arrefecimento. Tem ainda a vantagem de possibilitar uma maior homogeneidade no campo, na zona da amostra, afastando as bobinas do entreferro. A desvantagem é que esta não é uma solução prática se se pretender flexibilidade, pois retirar e colocar bobinas não é um processo fácil. Mantendo as 6 bobinas é possível alcançar o mesmo resultado alimentando apenas 4 (2+2). A única vantagem

desta solução é reduzir a indutância total (para demorar menos tempo a atingir o valor de corrente pretendido), pelo que a melhor forma de o fazer será ajustar a corrente de alimentação das 6 bobinas para 1,9 A, de acordo com (3.19). Do ponto de vista de eficiência energética, bem como do arrefecimento, esta solução também é vantajosa. Analisando as perdas por efeito de Joule, com a solução de remover duas bobinas ganha-se 28 W (de 84 W para 56 W) e com a solução de baixar a corrente em 6 bobinas ganha-se 50 W (de 84 W para 34 W).

O comprimento do enrolamento de RF deve ser maior que o comprimento da amostra no tubo de ensaio. Para que se tenha no mínimo 10 mm para a amostra, a bobina foi dimensionada para ter 15 mm de comprimento, dando uma folga para melhorar a homogeneidade da indução na amostra. Utilizando fio de cobre esmaltado de 0,27 mm de diâmetro, foram necessárias 50 espiras.

A indutância de uma bobina de núcleo de ar, com uma camada, pode ser calculada por (4.2) [21].

$$L (\mu H) = \frac{0,394d^2N^2}{18d + 40l} = 11,25 \mu H \quad (4.2)$$

$N$  é o número de espiras,  $l$  é o comprimento do enrolamento (em cm) e  $d$  é o diâmetro de forma do enrolamento (em cm), sendo que o diâmetro de forma é a soma do diâmetro interior da bobina com o diâmetro do fio esmaltado.

O comprimento do fio para formar a bobina é de 1,5 m, com as ligações é necessário cerca de 2 m de fio. Entre 1,5 m e 2 m, a resistência teórica da bobina é de [0,44; 0,59]  $\Omega$ . Na Figura 4.3 ilustra-se a bobina enrolada no tubo de vidro, fixa com teflon. A fixação com teflon deve-se ao facto de ter que ser um material resistente a temperatura elevada. Também se tem como objetivo principal medir amostras com hidrogénio. Mesmo que a fixação seja feita no lado exterior da bobina, o material não deve conter hidrogénio para que não interfira nas medições durante os ensaios.

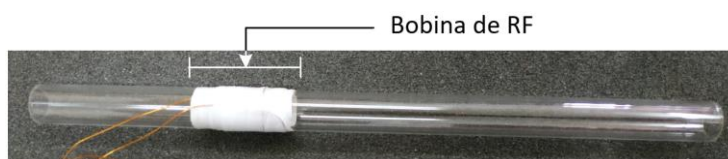


Figura 4.3 – Bobina RF.

A absorção da energia pela amostra é feita na frequência de Larmor, como visto no ponto 2.6, logo a ressonância da bobina com o condensador é feita para este valor. Considerando a condição de ressonância de um circuito RLC série, dada por (3.29), a capacitância é dada por (4.3).

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} = 28,7 \text{ pF} \quad (4.3)$$

Foram adquiridos condensadores variáveis de 7 a 100 pF (Vishay – BFC280907015). Na Figura 4.4 ilustra-se a PCB com dois condensadores montados, com os terminais de aperto mecânico para os fios da bobina e com pinos para permitir alterar o circuito, conforme ilustrado na Figura 4.5.

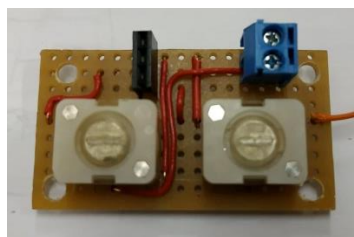


Figura 4.4 – PCB do circuito de prova.

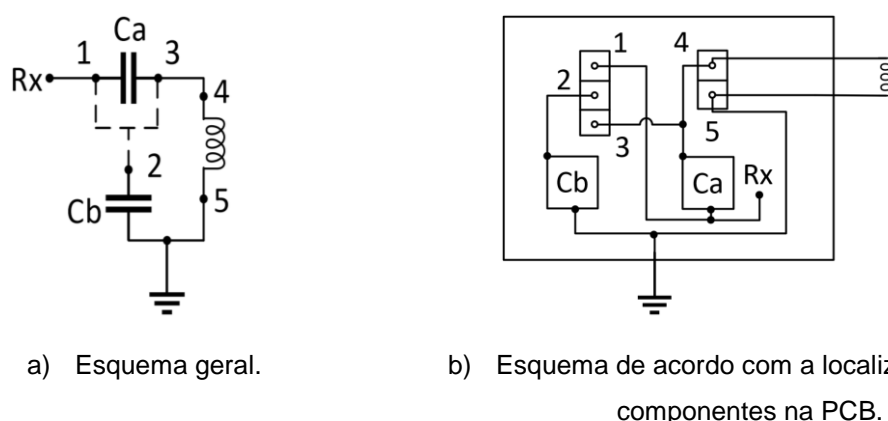


Figura 4.5 – Esquema de ligações da PCB do circuito de prova.

O segundo condensador (Cb) foi introduzido na PCB para que se possa testar o seu efeito no circuito, na tentativa de melhorar o ajuste da frequência de ressonância quando introduzida uma amostra que possa alterar o valor da indutância da bobina de RF.

Nota: Este dimensionamento não prejudica a adaptação futura para a indução máxima deste eletromagneto. Na frequência de Larmor de 13,585 MHz, para a mesma bobina de RF, a capacitância deverá ser 12,2 pF.

#### 4.1.2. Fator de qualidade e picos de tensão

Existem várias definições para o fator de qualidade de uma bobina. Por exemplo, pode-se relacionar a energia armazenada pela bobina com a energia dissipada na resistência quando a preocupação principal é a perda de energia [22]. Quando se pretende fazer a seletividade de sinais em frequência, este fator indica se o componente ou circuito é adequado, isto é, se a



impedância do circuito é capaz de mudar bruscamente na frequência de ressonância. Em série, isto acontece quando a resistência é baixa relativamente à impedância indutiva. Logo, o fator de qualidade em série pode ser definido por (4.4) [23].

$$Q_s = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (4.4)$$

$\Delta\omega$  é a largura de banda, da qual a sua gama de frequências é dada pelo decréscimo do valor máximo da corrente em  $\sqrt{2}$ , conforme dado por (4.5) e ilustrado na Figura 4.6.

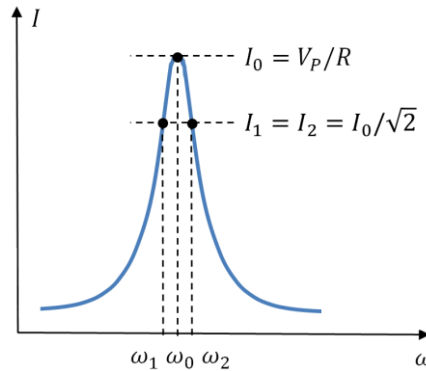


Figura 4.6 – Variação da corrente em função da frequência [28].

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \quad (4.5)$$

O fator de qualidade desta bobina, segundo (4.3), encontra-se entre o intervalo de [1061,7; 1423,7] Ω.

Se  $X_L = X_C$  e há um aumento de corrente no circuito, a tensão aplicada aos terminais da bobina e do condensador também aumentam, sendo as suas tensões dadas por (4.6).

$$V_L = V_C \Leftrightarrow \omega_0 L I = \frac{I}{\omega_0 C} \quad (4.6)$$

Na aquisição dos componentes é importante ter em consideração esta tensão. Se a tensão são 50 V e a resistência da bobina é de aproximadamente 0,59 Ω, em ressonância a corrente é de 84,7 A. Então, através de (4.6), os condensadores ficam sujeitos a uma tensão de 53057 V.

## 4.2. Sensor da indução de Zeeman

Existe um controlo da indução de Zeeman, para que o operador possa definir o campo que necessita. O campo é continuamente medido por um sensor de efeito Hall, que quando submetido a um campo magnético faz variar a tensão nos seus terminais, proporcionalmente



com a variação da indução. O sensor utilizado é o SS94A2D da Honeywell. A alimentação do sensor é feita a 10 V. Este sensor é bidirecional com uma gama de -2500 G a 2500 G, correspondendo a uma variação linear no sinal gerado entre 1,5 V e 6,5 V. Note-se que se se quiser futuramente aproveitar o campo máximo produzido por este eletromagneto, este sensor também deverá ser alterado.

Este sinal é enviado para um controlador proporcional integral na fonte de alimentação, de forma a controlar a corrente de alimentação das bobinas principais. Na Figura 4.7 encontra-se o sensor, onde se podem ver as suas ligações, feitas com fios entrançados para reduzir o ruído. Para a ligação dos 3 fios com a fonte de alimentação foi definida a utilização de uma ficha DB9, fêmea de montagem em painel (MULTICOMP – MC000963). Esta ficha vem com parafusos para garantir a fixação mecânica. Os fios têm um comprimento aproximado de 0,5 m, cada um com um diâmetro de 0,5 mm. O *pinout* desta ficha está no anexo III.



Figura 4.7 – Sensor Hall.

## 4.3. Sistema de aquecimento e monitorização da temperatura

### 4.3.1. Temperatura da amostra

Uma das funções do espectrómetro de RMN de CCR é fazer a regulação da temperatura da amostra durante o ensaio. Para esta função, o magneto de CCR foi projetado com um circuito para a passagem de ar pela amostra, que pode ser visto no ponto 5.1.4.

No caso de ser necessário arrefecer a amostra, o processo é feito pela passagem de ar a baixa temperatura pelo circuito. A temperatura do ar, neste caso, deverá ser regulada fora do magneto, podendo-se apenas utilizar o termopar colocado no circuito para medir a temperatura. O termopar utilizado é do tipo T, com cabo de aproximadamente 0,3 m (RS-PRO – 827-6028) e ficha fêmea de montagem em painel (RS-PRO – 455-9900). O termopar foi feito por brasagem com a adição de estanho.

No caso de se pretender aquecer a amostra, no circuito de passagem do ar, existe uma resistência elétrica (RS-PRO – 8607191) que permite atingir uma temperatura máxima de 500 °C. No entanto, esta temperatura encontra-se limitada a 150 °C, valor máximo pretendido para os ensaios. Esta limitação deve ser garantida pelo utilizador. A regulação da temperatura

é feita através de um controlador PID, que atua na alimentação da resistência. A alimentação é feita através de tensão alternada, com um valor máximo de 120 V, gerando uma potência de 400 W. Logo, a corrente máxima é de 3,3 A. O controlador encontra-se na fonte de alimentação. A resistência encontra-se ilustrada na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Resistência elétrica para aquecimento da amostra.

Como a resistência nunca deve ser alimentada sem que esteja ar a circular no seu interior, para não sobreaquecer, foi introduzido um sensor de fluxo de ar no circuito (Gems – FS-926). O sensor encontra-se ilustrado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Sensor de fluxo de ar.

Outro aspeto que deve ser protegido é que a resistência também só deverá funcionar se o ventilador do magneto estiver ligado. Assim, o esquema elétrico do controlo de temperatura é ilustrado na Figura 4.10.

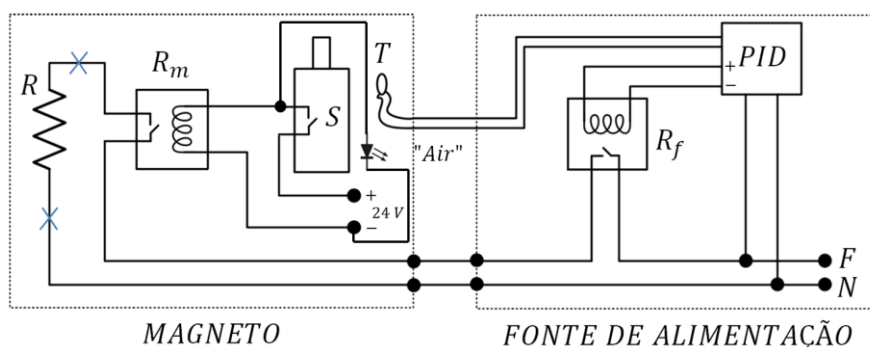


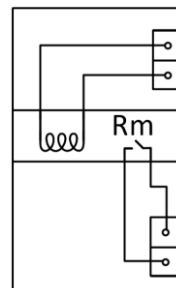
Figura 4.10 – Esquema elétrico do controlo de temperatura.

A alimentação de 24 V DC é comum à alimentação do ventilador. Também se pode ver que houve a necessidade de introduzir um relé eletromagnético no magneto,  $R_m$ . O relé escolhido (Forward – FRM18NA-24VDC) permite cortar até 5 A, 250 V AC e com uma potência máxima de 1250 VA. A carga é predominantemente resistiva, pelo que se pode equiparar a potência aparente dada pelo fabricante do relé à potência ativa dada pelo fabricante da

resistência. O  $T$  simboliza o termopar e o  $S$  o sensor de fluxo. O contacto do sensor que deve ser ligado é o normalmente aberto, como ilustrado no esquema. Na Figura 4.11 ilustra-se a PCB com o relé e os blocos terminais (CAMDENBOSS – CTB5202/2) para facilitar as ligações.



a) PCB montada no espectrómetro.



b) Esquema de ligações da PCB.

Figura 4.11 – PCB para o relé.

A alimentação da resistência entra no magneto por uma ficha de 3 contactos (macho), dos quais 2 são utilizados, montada no painel do magneto (BINDER – 09-0977-00-03). O *pinout* desta ficha encontra-se no anexo III. Em caso de manutenção, se se pretender remover a resistência não é necessário dessoldar nenhuma ligação. Para isso foi incluído um corte aos terminais da resistência, simbolizado no esquema por X. Este corte é feito no cabo que liga a resistência com a introdução de duas fichas: Mini-fit 4 contactos macho (Molex – 39-01-3043) e Mini-fit 4 contactos fêmea (Molex – 39-01-2040). O contacto destas fichas é feito por encaixe, com fixação mecânica. Estas fichas precisam dos terminais que vêm à parte. Para a ficha macho Molex – 5558TL e para a ficha fêmea Molex – 5556TL. O cabo tem 2 condutores com um diâmetro mínimo de 1 mm, com aproximadamente 0,3 m de comprimento.

#### 4.3.2. Temperatura do núcleo do eletromagneto

Um sistema de proteção implementado baseia-se na monitorização da temperatura do núcleo do eletromagneto, por meio de um termopar (igual ao descrito no ponto 4.3.1.). Esta informação é enviada para a fonte de alimentação, que cortará a alimentação das bobinas caso a temperatura seja muito elevada. Empiricamente definiu-se 60° C. A sua colocação será feita num ponto quente, numa das superfícies interiores do magneto.

### 4.4. Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento baseia-se num ventilador radial (embpapst – QG030-148/14), com duas aberturas na caixa do magneto, à semelhança da versão do espectrómetro anterior. O fluxo de ar no meio do eletromagneto deve ser vertical. As bobinas também devem estar o mais uniformemente distribuídas para que a eficiência do arrefecimento seja mais elevada. O

fluxo do ar foi definido tendo em conta a posição da resistência de aquecimento. O circuito de ventilação poderá ser visto no ponto 5.1.6 e o ventilador na Figura 4.12.

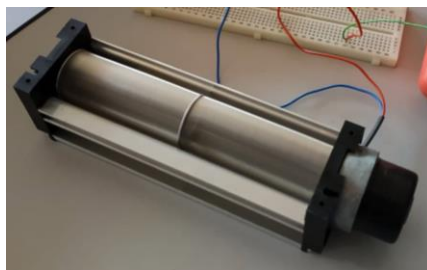


Figura 4.12 – Ventilador.

A alimentação do ventilador é feita a 24 V DC. O ventilador trás dois fios incorporados, que são ligados a uma ficha de 7 contactos (macho) montada no painel do magneto (Neutrik – NC7MD-LX). O *pinout* desta ficha encontra-se no anexo III. Uma das características da ficha é que permite uma fixação mecânica, melhorando o contacto com vibrações.

O ventilador deverá manter o seu funcionamento sempre que o magneto estiver a ser utilizado.

## 4.5. Sinalética

A sinalética do magneto é importante para que o utilizador possa receber o feedback do que o sistema está a fazer. Isto também permite informar se houver uma falha na alimentação.

Foram implementadas 3 sinalizações distintas, consideradas as mais importantes durante o funcionamento do espectrómetro: Sinalização para alimentação das bobinas principais “Field”; Sinalização para a alimentação do ventilador “Fan”; Sinalização de passagem de ar na amostra “Air”.

Se “Field” estiver ligado, o utilizador sabe que o campo estático está aplicado. Se “Fan” estiver ligado, o utilizador sabe que o ventilador está alimentado. A sinalização “Air” tem como objetivo principal sinalizar a passagem de ar na amostra, durante o processo de aquecimento. Para isso, a ligação é feita como ilustrada na Figura 4.10. Como consequência desta ligação, mesmo que haja ar a passar no circuito da amostra, sem que o ventilador esteja alimentado, a sinalização não acende.

Para o efeito foram seleccionados LED’s SMD (*surface mounted components*) devido às suas dimensões: 3,5 x 2,8 mm (Kingbright – KA-3528MBS). Estes são monocromáticos (azul) e têm uma tensão típica de condução de 3,8 V. Ilustra-se a placa com os LED’s na Figura 4.13.

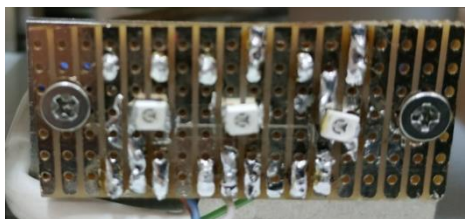


Figura 4.13 – PCB com LED's.

Para a sua alimentação foram ligados 3 divisores de tensão, os quais contam com R1 de 820  $\Omega$  e R2 de 150  $\Omega$ . As cores referidas no esquema, representado na Figura 4.14, representam as cores dos fios utilizados nas ligações.

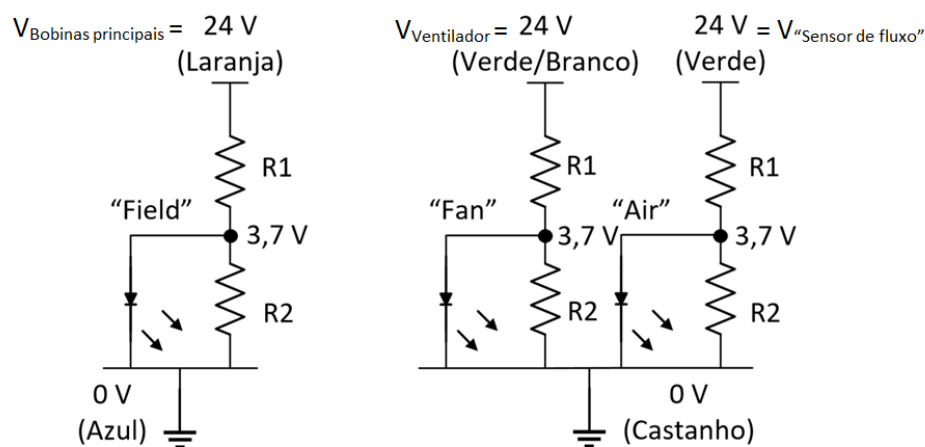


Figura 4.14 – Esquema da PCB LED's.

## 4.6. Sistema de rotação da amostra

As moléculas podem ou não alinhar-se com o campo. Dependendo do ângulo de alinhamento da amostra com o campo magnético, pode-se produzir informações adicionais sobre a ordem e o alinhamento das moléculas do sistema. Este sistema não está incorporado no interior do magneto mas o projeto prevê a possibilidade de fixação de um sistema de rotação da amostra na tampa. Este sistema ainda não está adaptado para esta versão do magneto mas será semelhante à versão anterior, ilustrado na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Sistema de rotação da amostra.

Como se pode ver na Figura 4.15, este sistema conta com um motor passo-a-passo para variar o ângulo.

# Capítulo 5

## Desenhos técnicos do magneto

Este capítulo tem como objetivo descrever o projeto e a montagem do magneto, nomeadamente, a sua configuração, os sistemas de ligação e fixação e detalhes de montagem. Este desenvolvimento consistiu em três fases: Modelagem em *software* de CAD 3D, SolidWorks 2014; Execução de uma maquete à escala real, através de impressão 3D de polímetros e maquinação em CNC; Montagem e ligação das peças e fichas do espectrómetro.





em contacto com o núcleo, sem alterar significativamente o seu funcionamento, sendo um material paramagnético. Além disso é mais leve que o ferro, fácil de maquinar e é um material de baixo custo.

Estes pilares serviriam de apoio ao eletromagneto, a ser colocado por cima, sendo elevados até ao topo da caixa para suportar o painel superior, “tampa”. Esta configuração foi pensada pois a idealização do que seria a caixa do magneto consistia em 6 painéis independentes, encaixados, formando um paralelepípedo, à semelhança da versão anterior do magneto, em funcionamento no laboratório de RMN do IST, ilustrada no Capítulo I. Esteticamente pretendia-se que a forma final resultasse numa aproximação de um cubo. no anexo V - a) também se pode ver o corte feito nos pilares para colocar palhetas entre eles. Dada a espessura dos pilares, seria necessário fechar as laterais para forçar o ar da ventilação a passar no centro do eletromagneto.

No entanto, produzir estes pilares seria dispendioso, principalmente, devido à sua maquinação, que requer fresagem. A solução para este problema, de forma a manter a funcionalidade principal de suportar o eletromagneto, foi fazer os pilares partindo de chapas de alumínio com 3 mm de espessura. Esta espessura atribui aos pilares resistência mecânica suficiente para suportar o peso do eletromagneto. As chapas quinadas, para além da redução do custo de maquinação, têm a vantagem de reduzir a espessura dos pilares, eliminando as palhetas e reduzido a quantidade de material utilizado. Melhor para o ambiente e para o utilizador que tiver que carregar a caixa, pois o seu peso também é reduzido. Os pilares desenhados são ilustrados no anexo V - b).

O resultado desta fixação é demonstrado na Figura 5.2, onde se pode ver a localização de cada um dos pilares. Quanto às fixações dos pilares à caixa, para simplificar, foram feitas roscas nos furos. Para fazer a fixação do eletromagneto aos pilares foi aproveitada a estrutura que prende as lâminas do núcleo, através de 2 furos passantes para parafusos M6. O pilar 4, por estar num canto da caixa, tem um bloco de alumínio para fazer a fixação da tampa, no respetivo canto. A necessidade de colocar esta peça é que a quinagem das chapas tem limites físicos, relacionados com as propriedades do material e da quinadeira, não podendo a aba ser inferior a um determinado comprimento. Para uma chapa de alumínio de 3 mm, a aba mínima deveria ser de 11 mm. De forma a facilitar a manutenção, podendo o eletromagneto ser posto e tirado, sem remover os pilares, foi colocado o bloco com apenas 6 mm. É possível fazer a manutenção do eletromagneto sem remover o bloco mas, por simplicidade, este não foi soldado mas sim fixado por 2 parafusos M3. O comprimento das abas não é a única limitação imposta pela chapa utilizada, tendo esta que ter um raio interior nas quinagens de 2 mm.

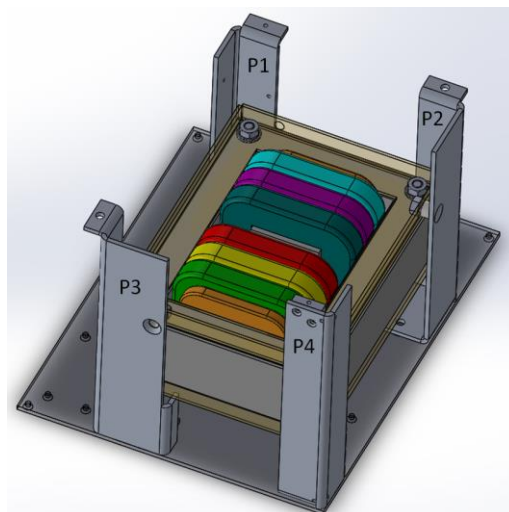
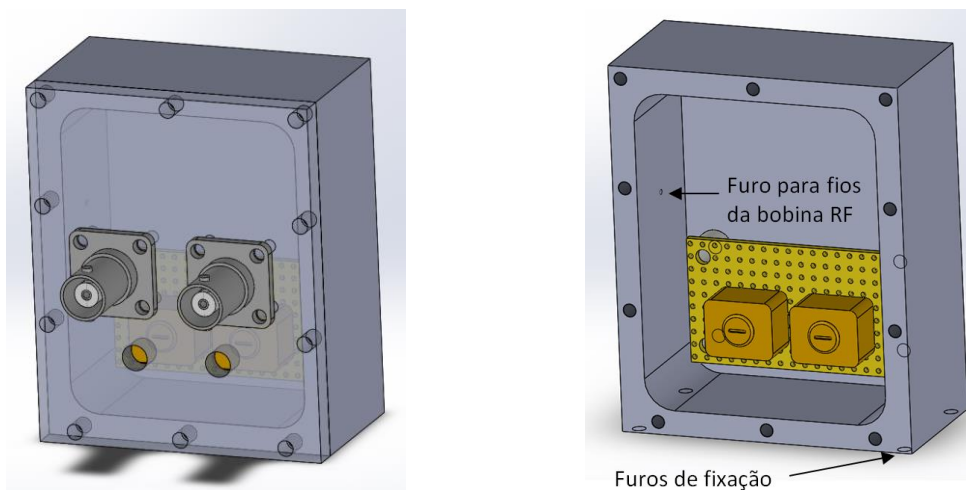


Figura 5.2 – Fixação do eletromagneto.

### 5.1.2. Circuito de prova

Como visto no ponto 4.1, o circuito de prova requer a ligação da bobina de RF a um condensador. O sinal de resposta captado pela bobina tem uma amplitude baixa e uma elevada frequência. Para reduzir a interferência eletromagnética foi desenvolvida uma caixa de alumínio, onde a PCB com os condensadores é montada. A expectativa é que a redução do ruído possa melhorar o sinal de resposta e também melhorar o funcionamento dos condensadores, que podem sofrer com o ruído, principalmente quando operam com tensões superiores ao seu valor nominal. A caixa de blindagem desenhada é ilustrada na Figura 5.3.



a) Vista geral da caixa de blindagem.

b) Vista da caixa de blindagem sem tampa.

Figura 5.3 – Caixa de blindagem.

Para o ajuste dos condensadores foram criados dois furos roscados M6 na tampa da caixa de blindagem, coincidentes com a furação da caixa do magneto. Esta furação tem como objetivo colocar dois pernos roscados sextavados interiores (com comprimento entre 12 e 16

mm), servindo de tampa para isolar a caixa durante o seu funcionamento, como ilustrado na Figura 5.3 – a). Desta forma sempre que se pretender fazer um ajuste não é necessário abrir o magneto nem a caixa de blindagem. A desvantagem desta solução é que a montagem dos condensadores na PCB deve ser rigorosa, para que fiquem centrados com a furação. No anexo VI estão representadas as dimensões para a colocação dos condensadores na PCB. A ligação dos fios da bobina à PCB é feita por aperto mecânico, com um bloco terminal de 2 contactos (CAMDENBOSS – CTB0308/2), para facilitar num procedimento de manutenção.

Na Figura 5.3 – b) pode-se ver a zona da entrada dos terminais da bobina na caixa. A passagem dos fios não é feita através de um furo mas sim por fichas BNC, sendo a ficha colocada nesse furo fêmea (TE Connectivity – 1-1337482-0). A fixação desta caixa é feita por 4 parafusos M3 à base do magneto.

Também como visto no ponto 4.1, a bobina de RF tem que ser colocada no entreferro. A estrutura prevista para fazer o suporte da bobina é constituída por dois tubos de vidro, soldados numa extremidade. Esta estrutura foi designada por *Dewar*. Os tubos de ensaio têm até 5 mm de diâmetro, delimitando o diâmetro mínimo interior do tubo representado a vermelho, na Figura 5.4. Tem que existir uma margem para a passagem de ar. As medidas representadas são as medidas que existiam disponíveis nos tubos de vidro. Estas medidas podem variar algumas décimas de milímetro, pois se se pretender uma medida muito precisa o custo desses tubos aumenta. O tubo interior tem como diâmetro exterior 9,1 mm, daí a forma da bobina, representada a laranja. O espaço entre os dois tubos também serve para fazer o isolamento térmico. A solução definida foi a utilização de folhas de isolamento térmico com 0,25 mm de espessura (RS-PRO – Nomex aramid paper type 410). Teoricamente permite dar 5 voltas.

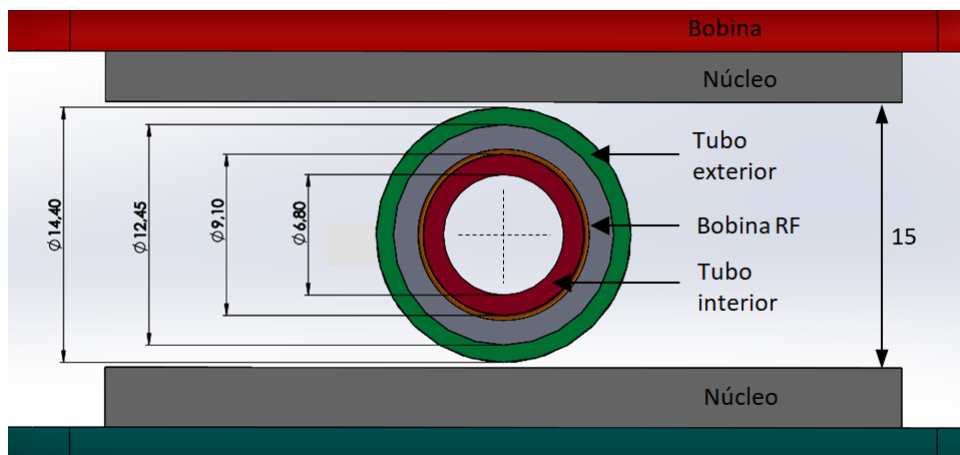


Figura 5.4 – Pormenor do entreferro em corte com o Dewar (mm).

A margem entre o *Dewar* e o entreferro é utilizada para revestir o *Dewar* com uma folha de cobre, de forma a fazer uma blindagem eletromagnética para reduzir a interferência das transições das bobinas principais no sinal de RF. A folha de cobre é ligada à massa da caixa, comum à massa do circuito de RF. Esta folha de cobre é cortada para não dar origem a

correntes induzidas.

Na Figura 5.5 ilustra-se o *Dewar* com a bobina de RF montada, com a dimensão que permite que a estrutura não saia para fora da tampa, atribuindo uma maior robustez e por uma questão estética. A bobina deve ser colocada de forma a ficar centrada com o entreferro.

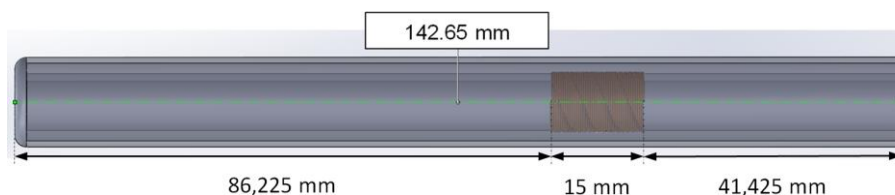


Figura 5.5 – Dewar (vista lateral).

A fixação superior do *Dewar* é feita através de um sistema de esmagamento de *o'ring* com ranhura triangular. O desenho é simples e a maquinação das peças também. Outras vantagens deste sistema são poder ser instalado de forma simples e requerer pouco espaço. Quando apertado dá estabilidade à estrutura, evitando que esta se fracture. O sistema encontra-se ilustrado na Figura 5.6. O *o'ring* utilizado suporta até 200 °C, com diâmetro interior de 14 mm e secção de 2 mm (Viton).

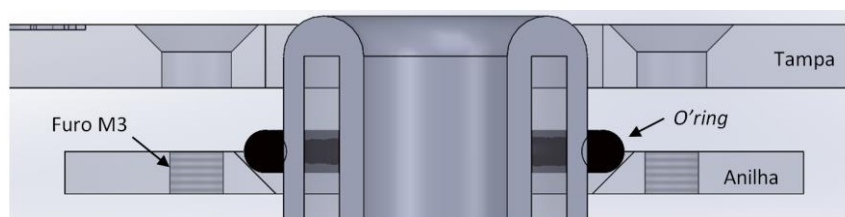


Figura 5.6 – Corte do sistema de fixação superior do Dewar.

Na Figura 5.7 ilustra-se a anilha desenhada para o respetivo sistema, onde se pode ver que foram definidos 3 furos M3 roscados para pressionar o *o'ring*. Foram também feitos 3 furos M3 passantes para o suporte do sistema de rotação da amostra.

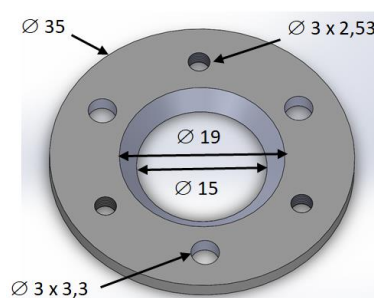


Figura 5.7 – Anilha de alumínio (mm).

Houve a necessidade de desenhar uma peça para fazer o suporte inferior do *Dewar*, ilustrada na Figura 5.8. O desenho da peça conta com uma estrutura para suportar e permitir a conexão com o *Dewar*. O encaixe é feito à pressão (não é necessário teflon para fixar o *Dewar* pois o cobre acomoda-o ao suporte). A maquinação desta peça parte de um cilindro de material e os cortes laterais servem para que a peça possa ter altura suficiente para dar o apoio ao

*Dewar* (zona onde estão as bobinas principais). A altura da peça não pode ser reduzida pois a entrada de ar tem que ser isolada termicamente.

Na base desta estrutura encontra-se um furo ( $\varnothing 3$  mm) para a passagem dos fios da bobina de RF para a caixa de blindagem.

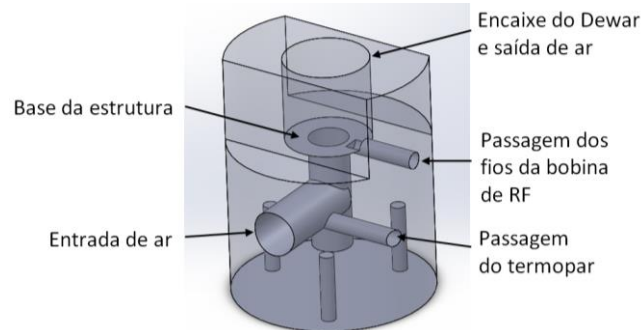


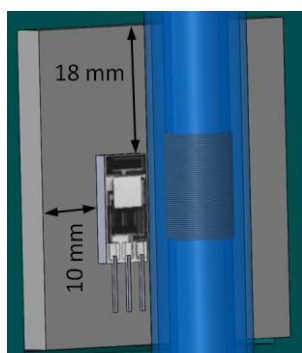
Figura 5.8 – Suporte do Dewar (vista interior).

A forma de fixação desta peça foi definida por 3 furos (M3 roscados), espaçados de  $120^\circ$  entre si, na sua base.

Os fios da bobina são soldados a um cabo coaxial (RG178), com uma ficha BNC macho (Radiall – R113182000W) na outra extremidade, que vai ligar à ficha BNC fêmea colocada na caixa de blindagem. Para o efeito o cabo deverá ter um comprimento de aproximadamente 0,3 m.

### 5.1.3. Medição da indução de Zeeman

A colocação do sensor de *Hall* deve ser feita no centro do entreferro, centrado também com a bobina de RF. Note-se que a zona sensível ao campo magnético é a parte superior do sensor, pelo que é esta que deverá ser centrada. A parte inferior do sensor é constituída por um amplificador. Como o centro está ocupado pelo *Dewar*, o sensor é colocado ligeiramente para o lado, como ilustrado na Figura 5.9.



a) Localização do sensor no entreferro.



b) Configuração do sensor [24].

Figura 5.9 – Localização do sensor de Hall.

O sensor é bidirecional e o circuito de controlo foi projetado para valores positivos da

tensão de saída do sensor, pelo que a sua colocação deve ser feita tendo em conta do sentido do campo apresentado nas Figuras 5.9 – b) e 5.1.

#### 5.1.4. Circuito de passagem de ar (amostra)

O circuito de passagem de ar para a amostra, isolado dos restantes sistemas do magneto, tem a configuração ilustrada na Figura 5.10.

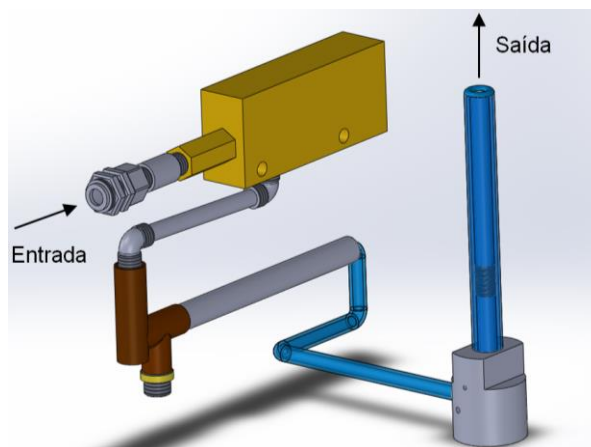


Figura 5.10 – Configuração do circuito de passagem de ar.

Independentemente de se pretender aquecer ou arrefecer a amostra, a circulação do ar deve ser forçada por meio exterior ao magneto, por exemplo, através de um compressor de ar. Partindo do princípio que os laboratórios, onde se espera que este equipamento opere, estão já equipados com linhas de ar comprimido. O adaptador selecionado para a entrada de ar no magneto é um acessório de *push-in fitting*, do tipo *bulkhead*. Este acessório é de montagem em painel e permite o encaixe direto de um tubo de 8 mm (SMC – KQ2E08-02).

O próximo componente do circuito é o sensor de fluxo de ar, que é ligado ao acessório *bulkhead* através de um extensor roscado R ¼ macho / R ¼ macho (RS-PRO – 499-3221). A fixação do sensor é feita, por meio de uma chapa de 1 mm de espessura, aos pilares do eletromagneto, tal como se ilustra na Figura 5.11. Apesar de que neste ponto do circuito ainda não há ar quente, a possibilidade de circulação de ar frio pode causar condensação nos componentes, pelo que todo o circuito é isolado termicamente. A distância entre o sensor e o suporte é de 9,5 mm. O isolamento térmico utilizado, para a zona de temperatura elevada, tem uma espessura de 10 mm, de material Aerogel (RS-PRO – 103-4078). O isolamento é preso através de braçadeiras plásticas que suportam 60 °C. Isto pois a temperatura no exterior do isolamento já tem que ser inferior a este valor.



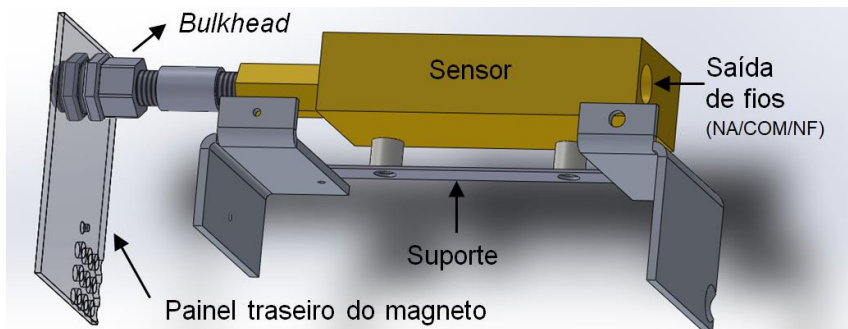


Figura 5.11 – Fixação do sensor e ligação ao acessório *bulkhead*.

A conexão do sensor à resistência elétrica pode ser vista na Figura 5.12, sendo feita através de 4 peças: 2 acessórios *push-in* 8 mm / R ¼ macho, do tipo *elbow* (RS-PRO – 299-4070); Tubo de nylon de 8 mm com um comprimento de 71 mm (legris – 1025P08 02); Tubo de cobre Ø 13 mm interiores (para que o acessório *elbow* abra uma ligeira rosca, sendo a sua conexão vedada com fita de teflon) com um comprimento de 47 mm, fechado numa extremidade. O tubo de cobre é soldado à resistência a frio com cola Pattex Nural 27, que suporta até 150 °C, isto para não danificar o componente com elevada temperatura da soldadura a prata. Esta soldadura garante que a união fique estanque.

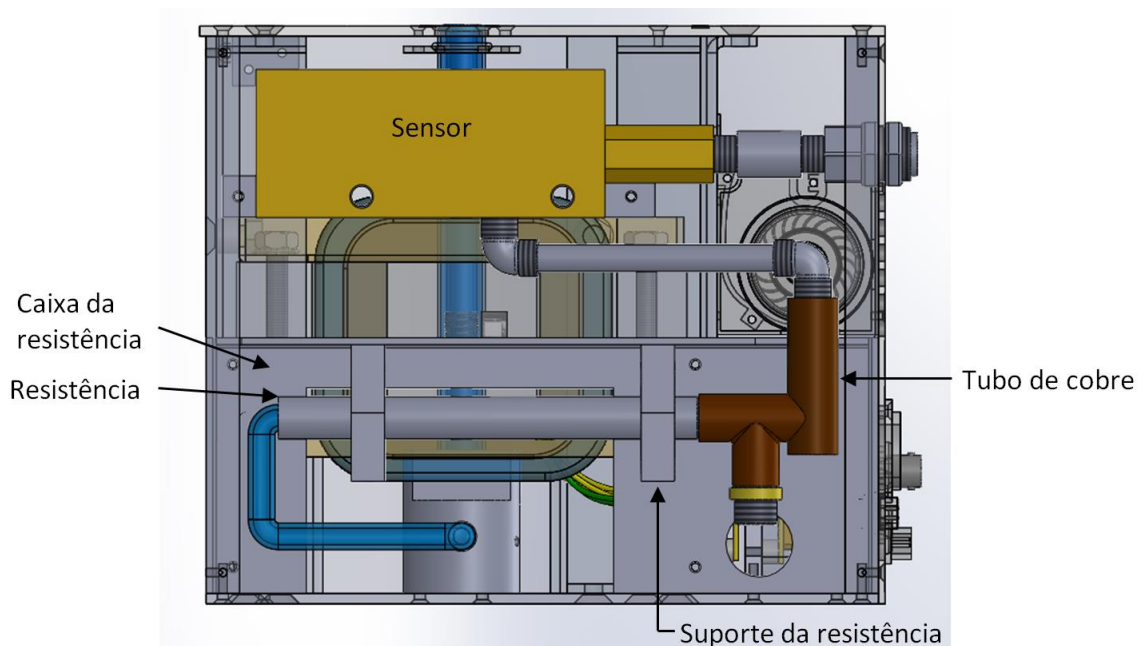


Figura 5.12 – Circuito de passagem de ar (vista lateral direita da caixa do magneto).

Para a fixação da resistência foram desenhadas 2 abraçadeiras, compostas por duas partes, ilustradas na Figura 5.12 e no anexo V – c). Apesar de a resistência ter um diâmetro de 12,7 mm, a abertura da abraçadeira tem um raio de 17 mm para fixar o isolamento térmico. Estas peças foram impressas em plástico PLA, que suporta aproximadamente 60 °C em carga.

A parte superior da abraçadeira é fixa a uma caixa desenhada com três objetivos, ajudar a conter a energia térmica libertada pela resistência, auxiliar a condução do ar da ventilação pelo

meio do eletromagneto e permitir uma montagem ou desmontagem modular, ou seja, em vez da montagem dos componentes ter que ser feita um a um na caixa do magneto, pode ser feita fora e montada como um bloco. Nas Figuras 5.12 e no anexo V – d) é possível ver a caixa da resistência.

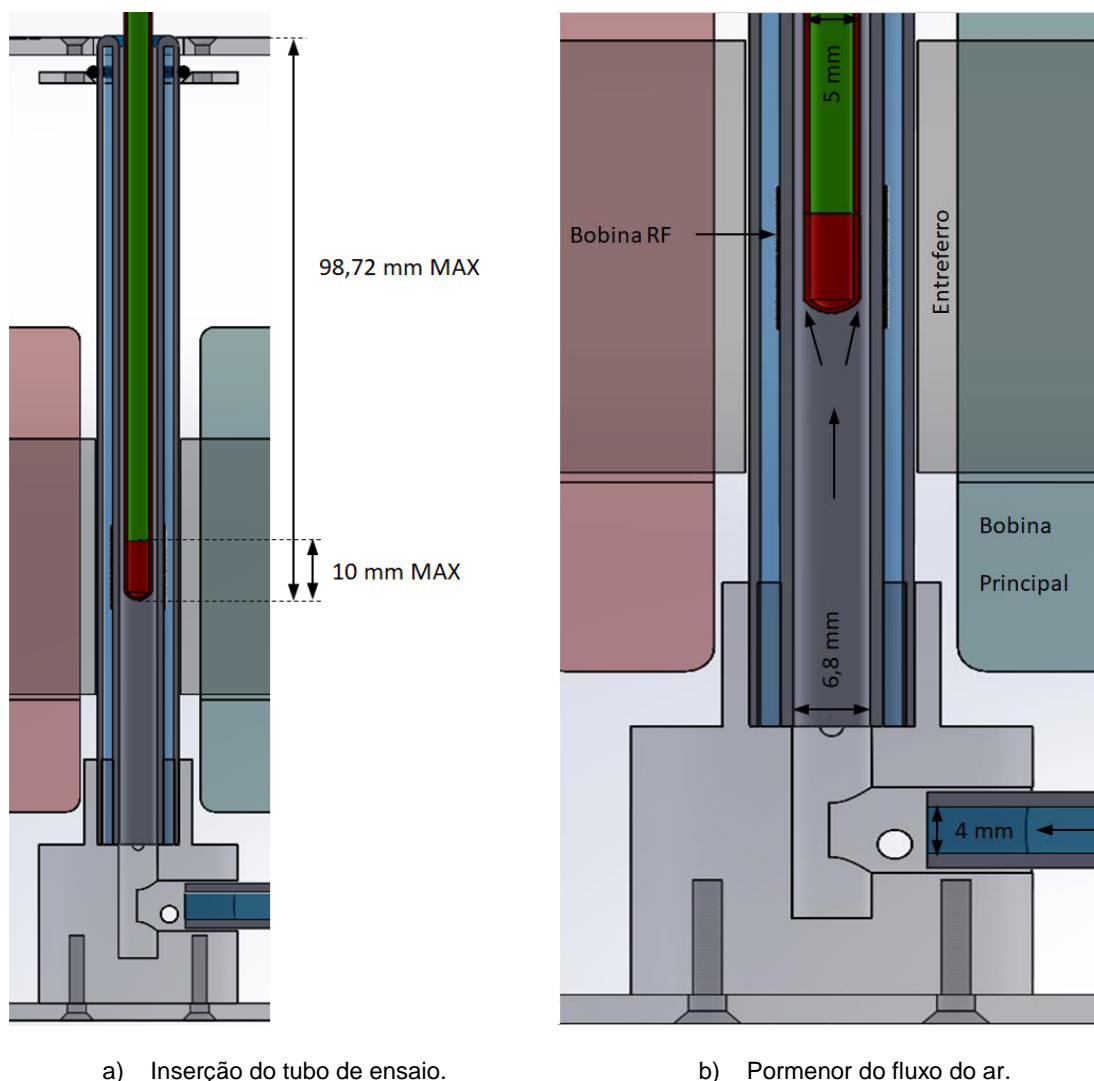
A caixa da resistência é fixa por 4 parafusos aos pilares do eletromagneto. A localização dos parafusos é marcada no isolamento pois estes ficam tapados pelo mesmo. As abas laterais dão estabilidade à caixa, auxiliando a montagem e a desmontagem dos componentes. Foi também criado um furo para passar os fios (e a ficha *mini-fit*) para se poder retirar a caixa, sem a necessidade de dessoldar nenhuma ligação.

A conexão da resistência ao suporte do *Dewar* é feita através de um tubo de vidro com dois diâmetros. Na ligação com a resistência o tubo tem 10 mm de diâmetro exterior. A conexão entre estes é feita por encaixe, ajustado com teflon. O tubo de 10 mm é soldado a outro de 7 mm, formando o tubo de vidro utilizado. A outra extremidade do tubo encaixa no suporte do *Dewar*, com o mesmo método de encaixe. Esta peça é ilustrada no anexo V – e) e esta ligação pode ser vista na Figura 5.14.

O suporte do *Dewar* já foi abordado no ponto 5.1.2 mas esta peça tem outras funções para além de suportar o *Dewar*. Esta peça permite a passagem do ar no seu interior, com a entrada de ar horizontal e a saída vertical. No suporte foi também introduzido um furo ( $\varnothing$  3 mm) para passar o termopar, para que este possa medir a temperatura do ar que chega à amostra. O encaixe do termopar neste furo é feito à pressão, sendo vedado por teflon.

Esta peça foi criada em dois materiais. A primeira versão foi em teflon, que permite até 260 °C. A segunda versão foi em cerâmica de vidro maquinável (MACOR –  $\varnothing$  35 x 100 mm), um material que se mantém estável até 800 °C, podendo ir até 1000 °C sem carga. O motivo da utilização do material cerâmico é a simplificação do isolamento térmico na zona da peça, servindo a própria peça de isoladora. As grandes desvantagens do MACOR é o seu preço e a dificuldade de encontrar quem saiba trabalhar com o material, o que também eleva significativamente o preço da maquinação. Também devido à fragilidade da rosca M3 fina neste material, em vez de parafusos metálicos tiveram que ser utilizados parafusos de teflon. O pormenor desta peça está ilustrado na Figura 5.8. Na Figura 5.13 ilustra-se o fim do circuito da passagem de ar, com o tubo de ensaio inserido no *Dewar*. A inserção do tubo de ensaio deve ser feita respeitando as medidas indicadas na Figura 5.13 – a), para que a amostra fique bem posicionada. Na Figura 5.13 – b), ilustra-se o pormenor do fluxo de ar quando é introduzido o tubo de ensaio, de onde se pode concluir que o circuito se encontra estrangulado para uma secção de 12,57 mm<sup>2</sup>.





a) Inserção do tubo de ensaio.

b) Pormenor do fluxo do ar.

Figura 5.13 – Fim do circuito de passagem de ar na amostra.

Para dar estabilidade ao *Dewar*, na extremidade oposta à que está soldada, foi criada uma anilha cortada, por onde é feita a passagem dos fios da bobina, ilustrada no anexo V – f). A anilha é feita em teflon, para que possa suportar uma temperatura elevada. Uma vez que esta parte do *Dewar* é colocada dentro da peça de MACOR, não é necessário que a anilha seja um isolante térmico.

Na Figura 5.14 é possível ver o circuito completo instalado dentro do magneto.

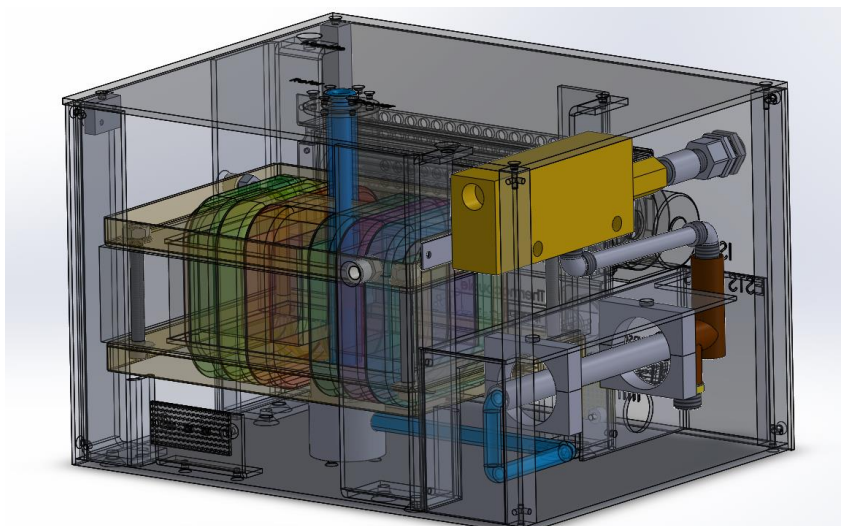


Figura 5.14 – Circuito de passagem de ar instalado no magneto.

Como referido no ponto 4.3.1, para o controlo do funcionamento da resistência é necessária a instalação de um relé. A PCB com a localização do relé é ilustrada na Figura 5.15, sendo as dimensões da PCB representadas no anexo VI.

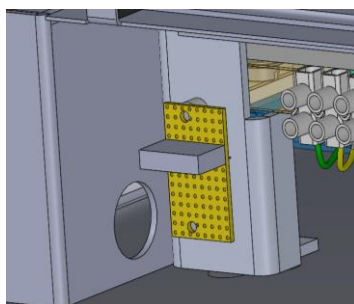


Figura 5.15 – Fixação da PCB para o relé.

### 5.1.5. Sinalética

Para fazer a sinalização de funcionamento não se pretendia a utilização de LED's de montagem em painel pois ficam com relevo no painel frontal do magneto. A solução definida foi a montagem de LED's SMD numa PCB, que é encostada ao interior do painel frontal. O desafio desta montagem consiste no alinhamento dos LED's na PCB para que coincidam com a furação do painel. No anexo V representa-se a PCB dos LED's com as respetivas dimensões.

A fixação da PCB é feita através de uma chapa quinada, fixa à base da caixa, a qual se ilustra no anexo V – g).

### 5.1.6. Circuito de ventilação

O ventilador era uma das peças já existentes, nas quais o projeto foi baseado, sendo o seu desenho ilustrado na Figura 5.16.

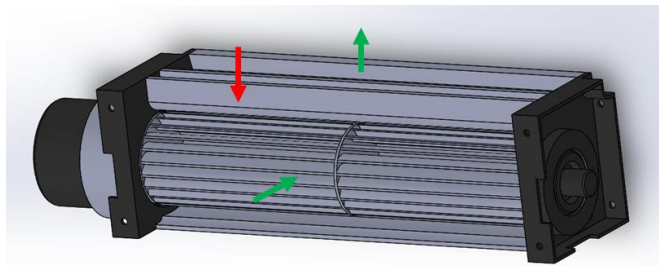


Figura 5.16 – Ventilador.

Pretende-se que o fluxo de ar faça um ângulo de  $90^\circ$ , como ilustrado por setas verdes na Figura 5.16. No entanto, pela configuração do ventilador, existiria ar que seria forçado a circular no sentido da seta vermelha. Para corrigir isto e para forçar o ar a passar pelo centro do eletromagneto, elevando a eficiência do sistema de ventilação, foi criada uma peça, a qual foi designada conduta do ventilador. A conduta foi também aproveitada para fazer a fixação do ventilador aos pilares do eletromagneto. Esta conduta é ilustrada na Figura 5.17.

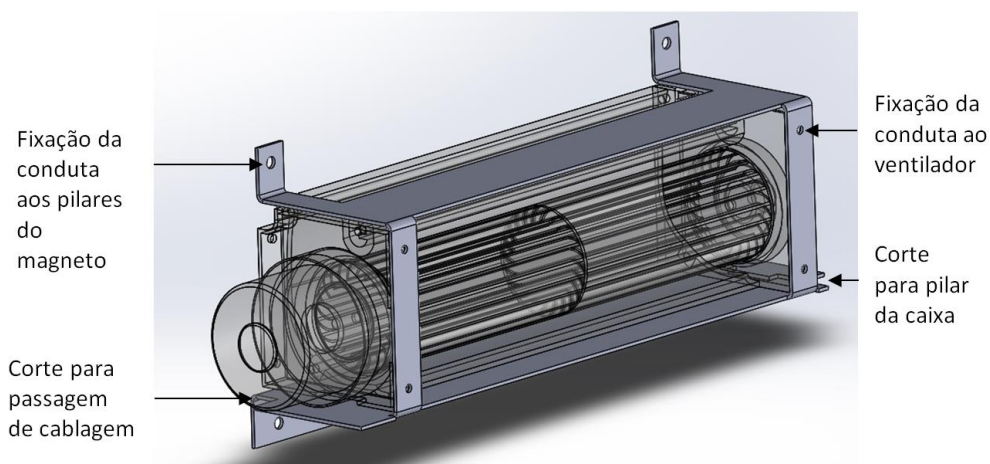


Figura 5.17 – Conduta do ventilador.

A conduta parte de uma chapa de alumínio de 1 mm de espessura, não menos para que tenha resistência mecânica suficiente para fazer o suporte do ventilador, sem que faça ruído durante o seu funcionamento.

Após ensaios feitos ao ventilador, concluiu-se que a distância que se deveria deixar entre a sua saída e um obstáculo, sem que o ventilador entre em esforço (saindo dos seus valores nominais), seria de 40 mm, a ver no ponto 6.5. A distância entre o ventilador e o interior da tampa da caixa é de 39,5 mm. Na Figura 5.18 ilustra-se o posicionamento do ventilador e o circuito de ventilação, representado por setas brancas.

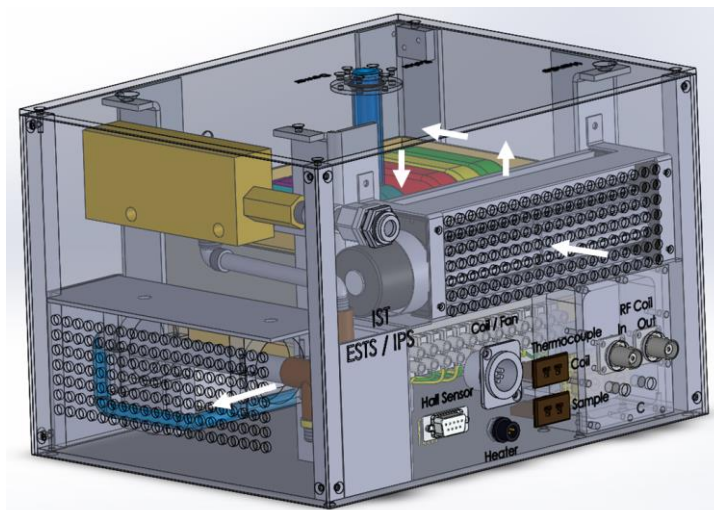


Figura 5.18 – Circuito de ventilação.

Na Figura 5.18 pode-se ver as aberturas feitas nos painéis para a entrada e a saída de ar da ventilação. Os painéis serão abordados no ponto 5.1.7.

Para garantir o espaçamento das bobinas foram criadas palhetas em ABS para colocar entre as bobinas. Estas são ilustradas no anexo V – h).

### 5.1.7. Painéis

A caixa é constituída por 6 painéis independentes, ilustrados no anexo VII.

A base e a tampa foram feitas por chapas de alumínio com 3 mm de espessura para dar estabilidade à caixa. Os restantes painéis têm 2 mm de espessura.

Por uma questão estética foi definido que os painéis laterais se sobrepõem à base, os painéis frontal e traseiro sobrepõem-se aos laterais esquerdo e direito e a tampa sobrepõe-se aos laterais. Os painéis foram lacados e serigrafados. A pintura da caixa também ajuda na proteção como uma camada isoladora. Foi definido que as fichas seriam todas ligadas no painel traseiro por estética e funcionalidade na arrumação dos cabos. Ainda por uma questão estética, todos os parafusos nos painéis foram embutidos.

Na tampa pode ser vista a indicação “Rotor”. Isto significa que parafuso mais próximo a essa indicação, juntamente com outros dois (espaçados de 120 °), servem para fixar à tampa o sistema de rotação da amostra. A etiqueta “Dewar” serve para indicar o conjunto de parafusos que fixam o *Dewar*. Ainda pode ser visto “Handle”, que serve para indicar a localização de onde a pega da caixa pode ser colocada. O sistema de pega é abordado no ponto 5.1.8. Quando os sistemas de rotação da amostra e de pega não estiverem a ser utilizados, os parafusos podem ser colocados na tampa, deixando o furo tapado e para que não se percam.

Foram postos 3 pilares de alumínio para fazer a fixação dos painéis. O desenho do pilar é ilustrado na Figura 5.19. Estes foram feitos de varas quadradas de 10 x 10 mm, uma medida standard por uma questão económica. Sendo que fazem a união de todos os painéis, a sua altura é a altura interior da caixa (167,25 mm).

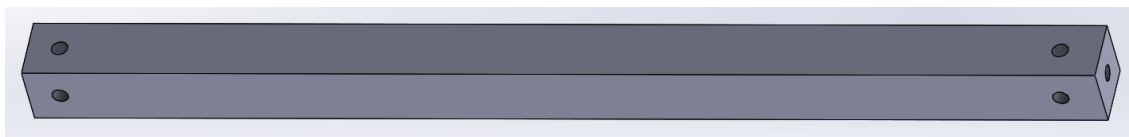


Figura 5.19 – Pilar para painéis.

Na Figura 5.20 ilustra-se a caixa fechada.



a) Vista de frente.

b) Vista de trás.

Figura 5.20 – Caixa do magneto (vistas exteriores).

Para a nova versão, o painel frontal foi alterado para incluir os símbolos do IST e da ESTS/IPS. Nesta versão as letras foram também aumentadas.

### 5.1.8. Sistema de pega

Este equipamento foi desenvolvido para trabalhar fixo num laboratório. Assim sendo, o sistema de pega da caixa foi definido como removível. Baseia-se numa pega que serve apenas para o transporte da caixa para o local pretendido. Para trabalhar com o equipamento a pega deve ser antes removida.

Foram desenhadas duas versões para a pega, ilustradas no anexo V – i). A alteração foi feita por uma questão económica.

A segunda versão é composta por 3 peças soldadas. Os apoios laterais são de alumínio de 3 mm de espessura. A barra central é de inox, com 25 mm de diâmetro, e foi deixado um espaço para os dedos de 3 cm, para que seja confortável de agarrar.

A pega é fixa aos pilares do eletromagneto. Como o peso do eletromagneto é elevado, relativamente aos restantes componentes, o centro de gravidade do espectrómetro não é significativamente afetado, sendo aceitável que a pega não seja colocada sobre este centro. No anexo V – j) ilustra-se o magneto com a pega.

## 5.2. Execução e montagem

Para expor o magneto foi criada uma maquete à escala real, composta por peças impressas em PLA e ABS. As impressoras disponíveis (Blocks One MKII) têm as seguintes dimensões: 200 x 210 x 210 mm. Isto significa que peças maiores não podem ser feitas ou têm que ser feitas em diferentes partes, como foi o caso da pega. A união das partes pode ser feita de várias formas, por exemplo, supercola, cola de contacto, soldadura por fricção ou acetona.

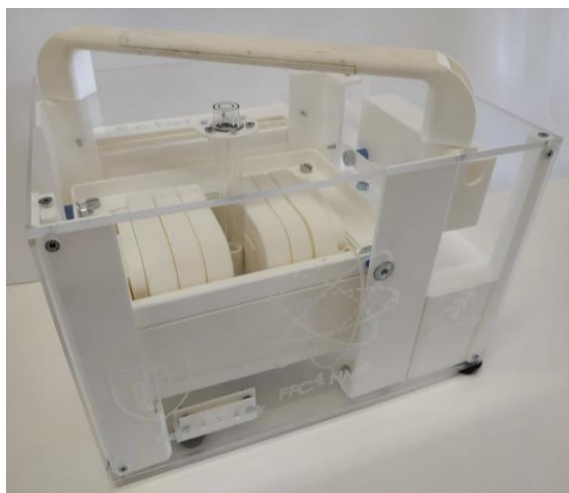
ABS é mais sensível a variações de temperatura, o que pode resultar em defeitos durante a impressão, como por exemplo, surgirem curvaturas nas peças. Uma impressora vocacionada para ABS normalmente é toda fechada. Além disso ABS deve ter um arrefecimento lento ou pode acabar por rachar na junção das camadas impressas. No entanto, em geral, o ABS suporta temperaturas mais elevadas e maior esforço mecânico (ABS 100 °C e PLA 60°C). Nenhum dos dois é um plástico flexível mas ABS acaba por dobrar mais antes de partir. Um exemplo da aplicação do ABS são os blocos de LEGO. A regra genérica de impressão 3D é de 45 ° para saliências mas o PLA resulta melhor na impressão de estruturas mais complexas. O custo de ambos os materiais é semelhante mas a impressão em ABS tem mais requisitos, tipicamente, tornando a impressora mais dispendiosa.

O *software* utilizado para a preparação das impressões 3D foi o Cura 4.4.0 da Ultimaker.

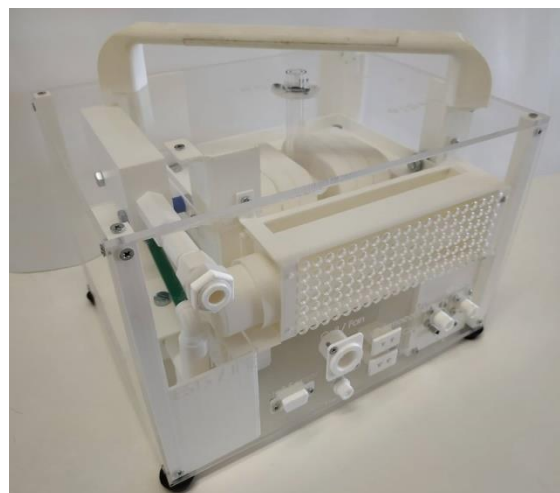
Para o interior do magneto ser visível, os painéis da maquete foram feitos de placas de acrílico, cortadas e perfuradas no laboratório de impressão 3D da ESTS/IPS (*Innovation Lab*), numa máquina a comando numérico computadorizado (CNC). O *software* utilizado foi o Fusion 360 da Autodesk 2019, um *software* com Desenho Assistido por Computador CAD, Manufatura Assistida por Computador (CAM) e Engenharia Assistida por Computador (CAE) integrado, do qual foi explorada a vertente CAM para programar e otimizar o processo de manufatura.

A montagem da maquete foi útil para fazer ajustes antes de execução das peças para o magneto, as quais foram feitas através da Varisom-controlo Electrónico, Lda, do núcleo de oficinas no IST, do laboratório de mecânica e do Innovation Lab da ESTS/IPS. No anexo VIII encontra-se a lista das peças criadas. A lista do material adquirido encontra-se no anexo IX, com as respetivas referências e fornecedores. Na Figura 5.21 ilustra-se a maquete montada.





a) Vista de frente.



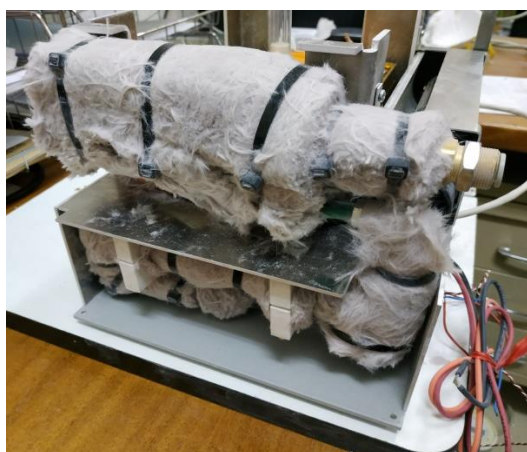
b) Vista de trás.

Figura 5.21 – Maquete do magneto de RMN-CCR<sup>4</sup>.

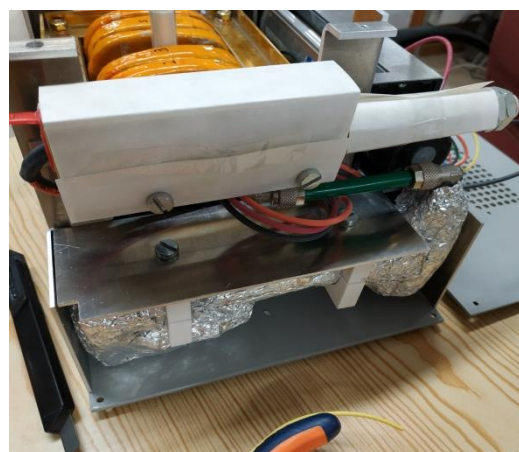
A configuração do magneto e das respetivas peças teve em conta a forma e sequência de montagem. A sequência é representada no anexo X.

### 5.2.1. Aspetos práticos da implementação final

Uma vez que o isolamento Aerogel (RS-PRO – 103-4078) liberta pequenas partículas, de forma a evitar que estas sejam libertadas para o ar em circulação durante a ventilação do magneto, todo o isolamento foi revestido por folhas de alumínio. Assim, decidiu-se que a parte fria do circuito de ar é revestida, na sua maioria, por folhas de isolamento térmico Normex, como ilustrado na Figura 5.22.



a) Versão 1.



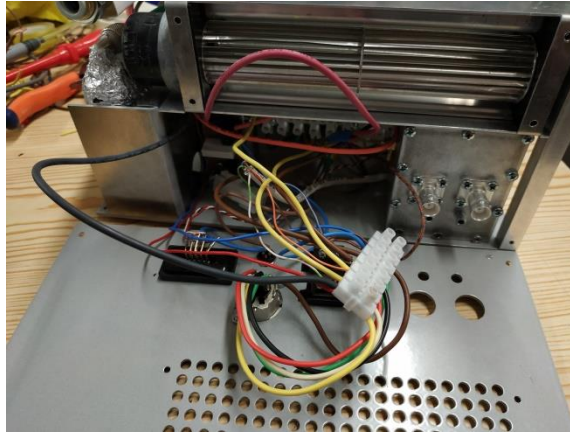
b) Versão 2.

Figura 5.22 – Isolamento térmico do sensor e do tubo de vidro.

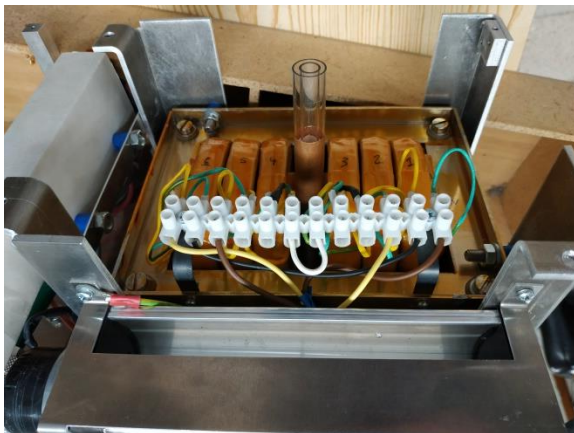
Verificou-se experimentalmente que o diâmetro das abraçadeiras para a fixação da resistência, com o isolamento selecionado, deve passar de 34 mm de diâmetro para 25 mm

pois o isolamento comprime bastante quando apertado.

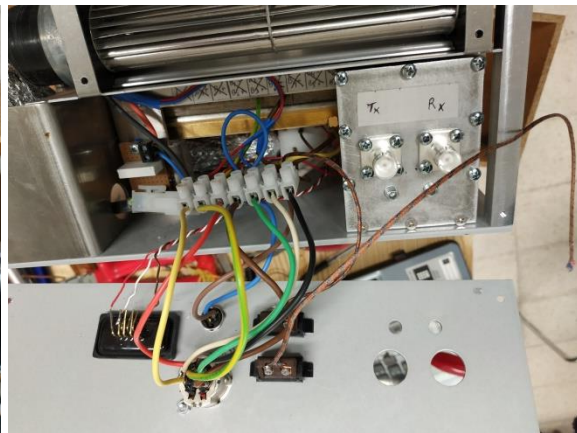
Relativamente à cablagem, verificou-se que a arrumação dos fios é complexa na zona das ligações do magneto. Para libertar espaço nesta zona, o eletromagneto foi rodado 180°, fazendo com que os fios das bobinas ficassem para cima. Esta alteração requer a fixação dos dados de ligações através de suportes em “L”, como se pode ver na Figura 5.23.



c) Versão projetada.



d) Versão melhorada (dados de ligação).



e) Versão melhorada (zona de ligações).

Figura 5.23 – Ligações do eletromagneto.



# Capítulo 6

## Resultados experimentais

Neste Capítulo pretende-se experimentalmente avaliar os resultados obtidos nas simulações e cálculos analíticos. Serão ensaiadas as bobinas principais e auxiliares do eletromagneto e a bobina de RF, destacando-se a determinação do valor das indutâncias. Será também feito o mapeamento 3D do campo de indução magnética no entreferro, a medição do campo residual, o cálculo do fator de franja e o ensaio ao ventilador.

## 6.1. Parâmetros das bobinas

### 6.1.1. Bobinas principais e auxiliares

A medição direta da resistência foi feita com um multímetro UNI-T UT39B. O valor obtido analiticamente foi  $9,33 \, \Omega$ . Admitindo uma simetria perfeita entre bobinas daria  $1,555 \, \Omega$  em cada. Comparando os resultados obtidos pelo método direto (apresentados na tabela 6.1) com o valor analítico, verifica-se que são aproximados (com uma diferença de  $\sim 0,7\%$ ). O método de corrente alternada também funciona mas a resolução das medições feitas com o wattímetro Chauvin-Arnoux PX 120 leva a erros maiores.

A medição de indutâncias foi feita por três métodos: Direto; Corrente alternada; Ressonância. Para o método de ressonância foi utilizada uma capacidade de  $9,63 \, \mu\text{F}$ . Na Figura 6.1 ilustra-se o esquema com as 6 bobinas, em montagem aditiva (linha vermelha) ou subtrativa (linha azul), tendo como exemplo o método de corrente alternada.

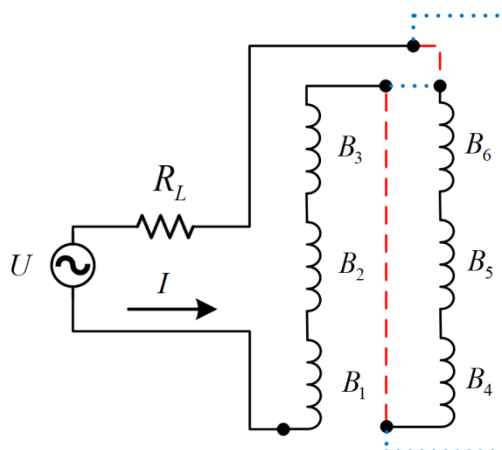


Figura 6.1 – Esquema com 6 bobinas – método corrente alternada.

Na tabela 1 apresentam-se os resultados obtidos nas medições dos parâmetros das bobinas.

Tabela 6.1 – Medição de resistências e indutâncias.

Medição de Resistências:		Metodo direto	Metodo CA
		R [ $\Omega$ ]	R [ $\Omega$ ]
Individuais (Todas colocadas no ferro)	B6	1,6	1,8
	B5	1,7	1,7
	B4	1,6	1,6
	B3	1,7	1,6
	B2	1,7	1,6
	B1	1,7	1,8
	Bb	33,9	40,0
Ba		35,1	45,3
2 Bobines		3,3	3,3
4 Bobines		6,5	6,7
6 Bobines		9,4	11,1

a) Medição de resistências.

Medição de Indutâncias:		Metodo direto	Metodo CA	Metodo ressonancia
		L [mH]	L [mH]	L [mH]
Individuais (Todas colocadas no ferro)	B6	30,31	34,36	30,49
	B5	24,08	27,02	24,24
	B4	17,54	19,43	17,84
	B3	16,70	18,42	16,87
	B2	23,42	26,11	23,72
	B1	29,62	33,54	29,72
	Bb	144,10	142,35	153,28
Ba		145,40	133,46	154,93
Montagem aditiva - Indutância				
		L [mH]	L [mH]	L [mH]
2 Bobines	B1, B6	80,21	91,82	82,37
	B2, B5	67,32	76,21	68,96
	B3, B4	53,88	59,92	54,84
4 Bobines	B1, B2, B5, B6	282,00	323,62	294,54
	B2, B3, B4, B5	229,50	260,17	237,67
	B1, B3, B4, B6	239,20	271,29	250,36
6 Bobines	Todas	548,60	625,01	585,96
Montagem subtrativa - Indutância de dispersão				
		L [mH]	L [mH]	L [mH]
2 Bobines	B1, B6	40,45	43,97	39,67
	B2, B5	28,33	30,14	27,91
	B3, B4	15,05	15,61	15,05
4 Bobines	B1, B2, B5, B6	125,00	135,48	125,63
	B2, B3, B4, B5	74,10	78,60	74,42
	B1, B3, B4, B6	83,98	90,52	83,86
6 Bobines	Todas	199,00	214,79	204,18
Peso da indutância de dispersão relativamente à indutância				
		$L_d$ [%]	$L_d$ [%]	$L_d$ [%]
2 Bobines	B1, B6	50,43	47,89	48,16
	B2, B5	42,08	39,55	40,47
	B3, B4	27,93	26,05	27,45
4 Bobines	B1, B2, B5, B6	44,33	41,86	42,65
	B2, B3, B4, B5	32,29	30,21	31,31
	B1, B3, B4, B6	35,11	33,37	33,50
6 Bobines	Todas	36,27	34,37	34,85

b) Medição de indutâncias.

Comparando os métodos de medição, o método direto (através de um medidor L/C/R Promax MZ-505) apresenta resultados mais próximos do método de ressonância. Também considerando a resolução inferior nas medidas obtidas pelo método de corrente alternada, é aceitável a diferença para as outras medições. No entanto, comparando o valor de indução total (6 bobinas – método aditivo) com o valor determinado em simulação (659,35 mH), o método de corrente alternada é o mais próximo do simulado. O valor da indutância de dispersão simulado (197,73 mH) está mais perto dos valores obtidos nos métodos direto e por ressonância.

Considerando que as bobinas estão praticamente encostadas às partes exteriores do núcleo, é esperada a influência da dispersão nos resultados obtidos. Em simulação o seu peso sobre a indutância total é de 30% comparado com 34,85% do método de ressonância. De realçar que as condições da simulação não foram exatamente idênticas ao caso real. A simulação foi feita com apenas 2 bobinas, cada uma considerando a junção de 3. Também o

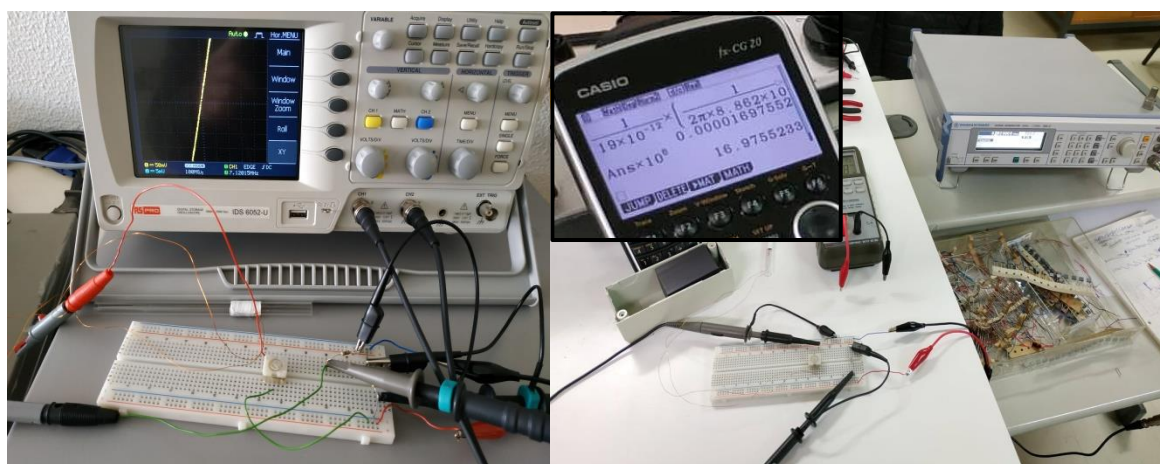
espaço deixado entre as bobinas e as pernas exteriores é maior na simulação, o que conduz à dispersão obtida na indutância de dispersão.

É ainda importante realçar que a indutância depende da posição de cada um dos enrolamentos no núcleo (ao longo das pernas centrais). Nas medições das indutâncias individuais, com todas as bobinas colocadas no eletromagneto, pode-se ver uma simetria (aproximada) pois as bobinas são idênticas e o núcleo é simétrico. Conclui-se experimentalmente que a indutância decresce com a aproximação das bobinas do entreferro.

Comparando com a indutância medida na versão do eletromagneto estudada na dissertação do Doutor António Roque (270 mH – 4 enrolamentos [4]), tem-se 294,54 mH com as 4 bobinas mais afastadas do entreferro (B1, B2, B5 e B6), através do método de ressonância. Pelo mesmo método verifica-se que com as 6 bobinas a indutância praticamente duplica.

### 6.1.2. Bobina de RF

A medição da indutância de RF é difícil de fazer através de um medidor R/L/C, resultando em valores medidos pouco credíveis, no caso, o valor medido foi de  $5,9 \mu\text{H}$ , a uma frequência de medição do aparelho de 1 kHz. No entanto o aparelho mede bem capacidades, tendo sido testado com condensadores fixos como padrão. Assim, o ensaio para determinar a indutância da bobina de RF foi feito através do método de ressonância. Para isso foi necessário um gerador de sinais de alta frequência (LEADER – 3216 – 0,1 a 140 MHz). O ensaio encontra-se ilustrado na Figura 6.2 – a).



a) Ajuste de frequência.

b) Ajuste do condensador.

Figura 6.2 – Medição da indutância da bobina de RF.

Ajustado o condensador para 28,8 pF, a frequência de ressonância obtida foi de 7,12 MHz. Logo, através de (3.30) a indutância é de  $17,3 \mu\text{H}$ , sendo um valor aproximado do valor obtido analiticamente  $11,25 \mu\text{H}$ . O ensaio foi feito com a variação da frequência em vez do ajuste do condensador pois este é sensível e o ensaio poderia ter uma maior incerteza

associada. Mas também foi feito o ensaio para a frequência de ressonância pretendida de 8,862 MHz (desta vez com o gerador de sinais ROHDE&SCHWARZ – 1090.3000.11 – 9 kHz a 1,1 GHz), que resultou num ajuste do condensador para 19 pF, resultando numa indutância de 17  $\mu$ H, ilustrado na Figura 6.2 – b).

A medição da resistência desta bobina através do multímetro (FLUKE – 115) deu 0,6  $\Omega$ , sendo igual ao valor obtido teoricamente para 2 m de comprimento do fio.

Através da expressão (4.4) o fator de qualidade desta bobina é de, aproximadamente, 1605, sendo maior que o intervalo determinado teoricamente [1061,7; 1423,7]  $\Omega$  pois a indutância medida foi ligeiramente superior ao valor do cálculo analítico.

## 6.2. Mapeamento do campo

O ensaio para fazer o mapeamento do campo ilustra-se na Figura 6.3, com recurso à utilização e uma mesa de 3 eixos e um gaussímetro.

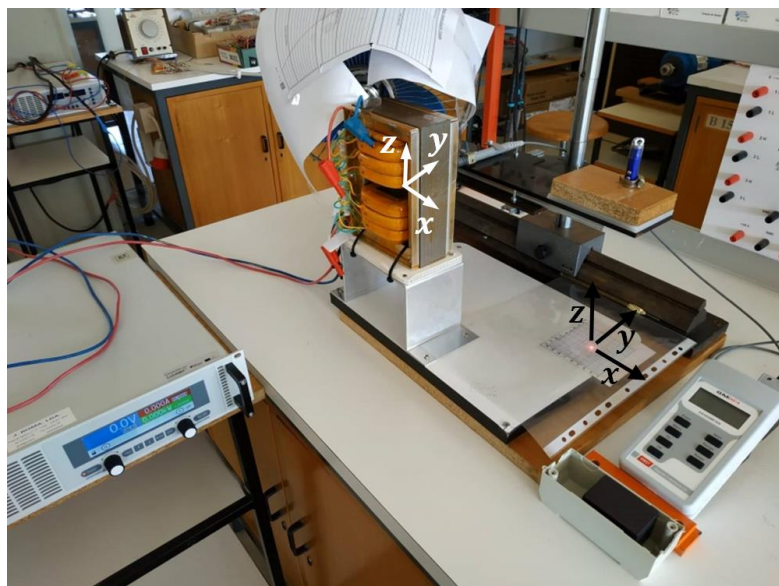


Figura 6.3 – Mapeamento do campo com mesa de 3 eixos.

O gaussímetro utilizado é da HIRST – GM08. Foi definida como origem do referencial o centro do entreferro em cada um dos 3 eixos (representado a branco na Figura 6.3). Após o ajuste da coordenada z na mesa de 3 eixos, a medição da camada é feita com o auxílio do ponteiro laser no plano x,y (representado a preto na Figura 6.3). Se for feito um varrimento ao longo do eixo central do entreferro, como simulado no FEMM (no ponto 3.2.3), a distribuição da indução magnética obtida é ilustrada na Figura 6.4, para uma corrente de 3 A.

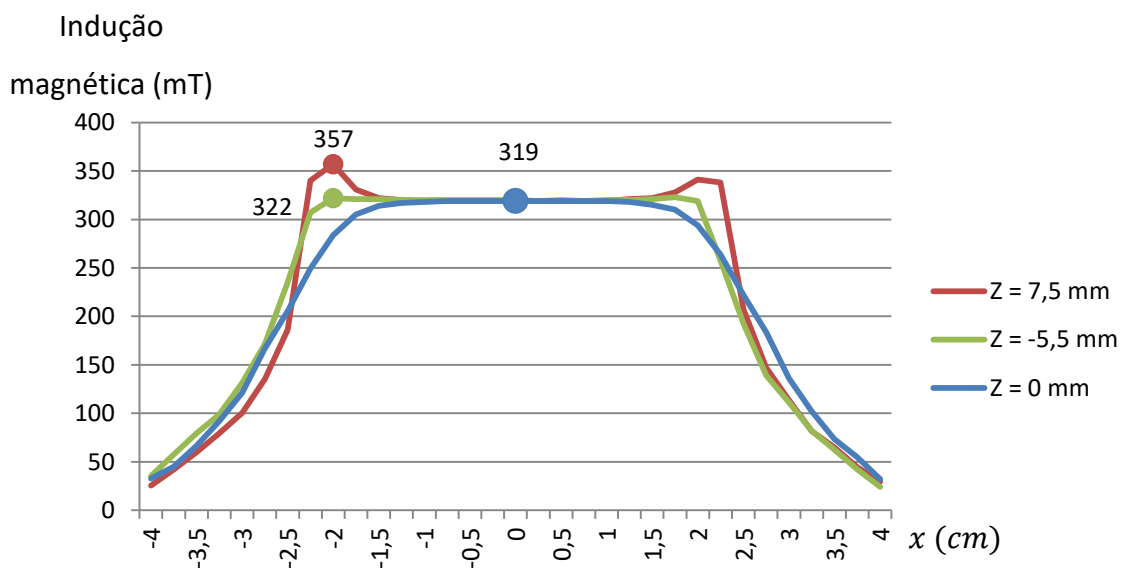


Figura 6.4 – Indução magnética no eixo central ( $y = 0 \text{ mm}$ ).

A indução magnética obtida no ensaio experimental no centro do entreferro (linha azul) foi semelhante à indução magnética obtida por simulação, tendo um valor máximo de 319 mT comparado com 327,8 mT, o que corresponde a um erro de 2,7 %. Também os valores médios são aproximados, com 223,4 mT obtidos no ensaio e 236,6 mT na simulação. Apesar do valor máximo da simulação se aproximar mais do cálculo analítico (327 mT), é normal que o valor experimental seja ligeiramente inferior, considerando que foram desprezadas algumas perdas nos cálculos teóricos. Através do ensaio também se pode verificar a existência de picos nas extremidades dos polos (nas camadas  $z = 7,5 \text{ mm}$  e  $z = -5,5 \text{ mm}$ ), embora seja mais difícil de os detetar sem uma boa resolução de medida. Experimentalmente parece até que este efeito aumenta área onde o campo é mais uniforme, na cota  $z = -5,5 \text{ mm}$ .

O mapeamento tridimensional da distribuição do campo, por camada, é ilustrado nas Figuras 6.5 a 6.10.

Os primeiros ensaios foram feitos com 289 pontos, verificando-se uma baixa resolução para comparar com a simulação. Optou-se por aumentar o número de pontos medidos para 1089. Para simplificar foram destacados os pontos máximos e mínimos, por área, nas curvas de nível.



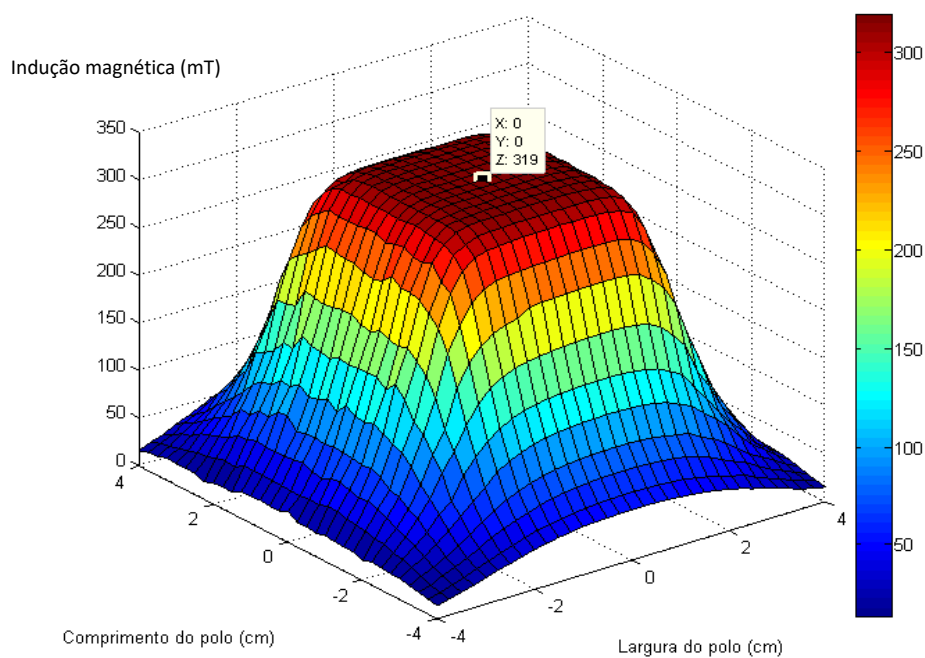


Figura 6.5 – Distribuição da indução magnética na camada  $z = 0 \text{ mm}$  – resultado experimental.

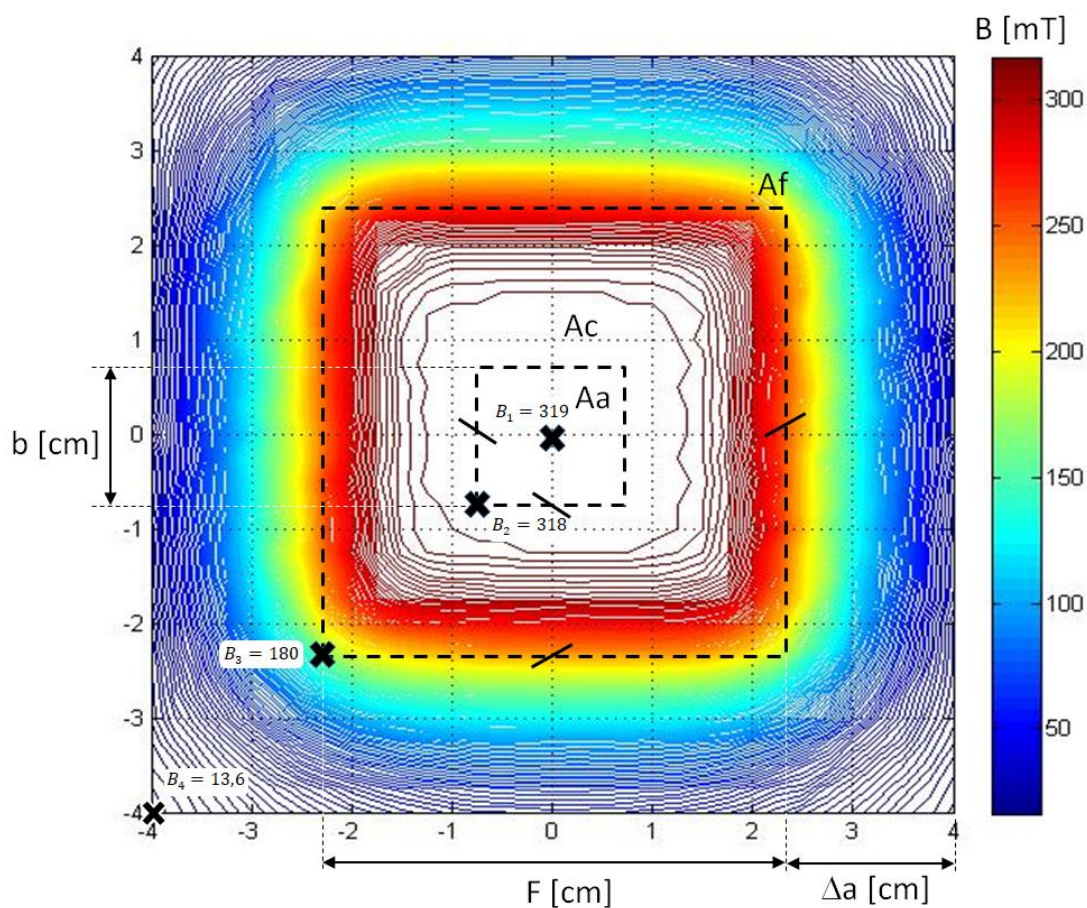


Figura 6.6 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada  $z = 0 \text{ mm}$  – resultado experimental.

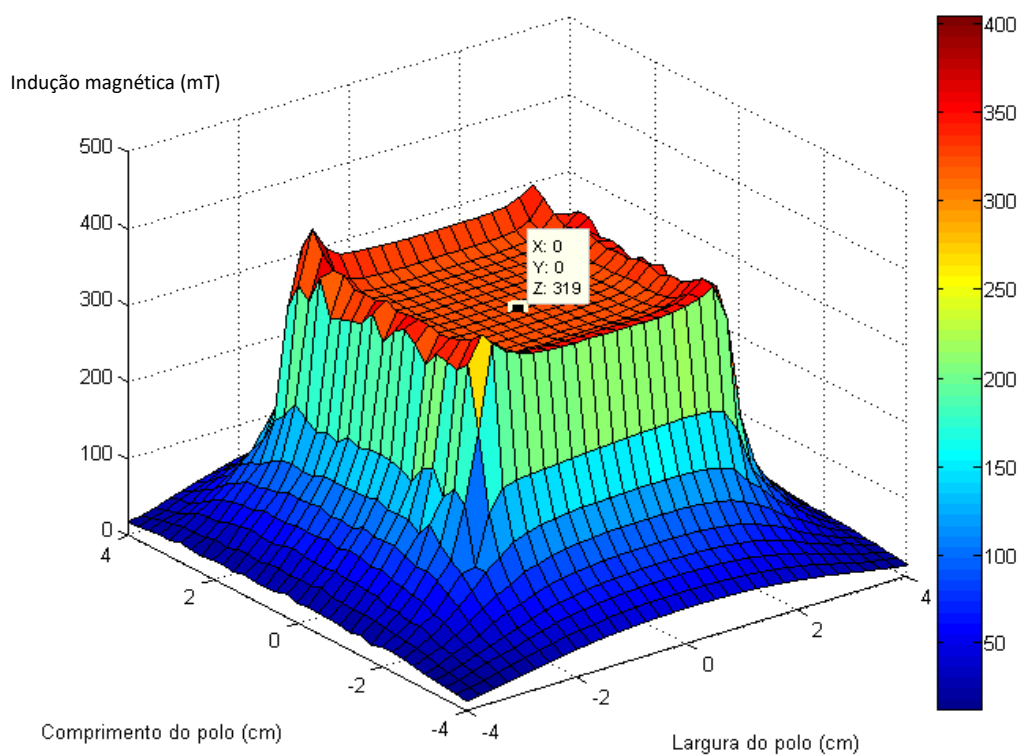


Figura 6.7 – Distribuição da indução magnética na camada  $z = 7,5 \text{ mm}$  – resultado experimental.

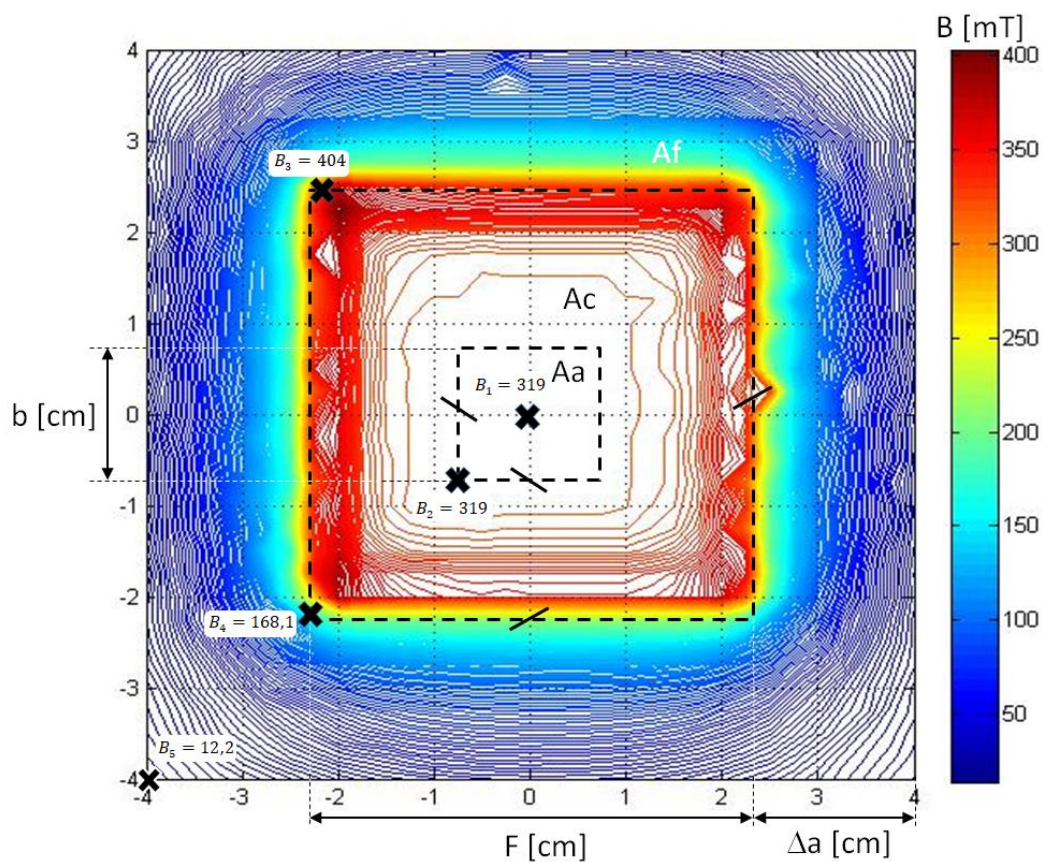


Figura 6.8 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada  $z = 7,5 \text{ mm}$  – resultado experimental.



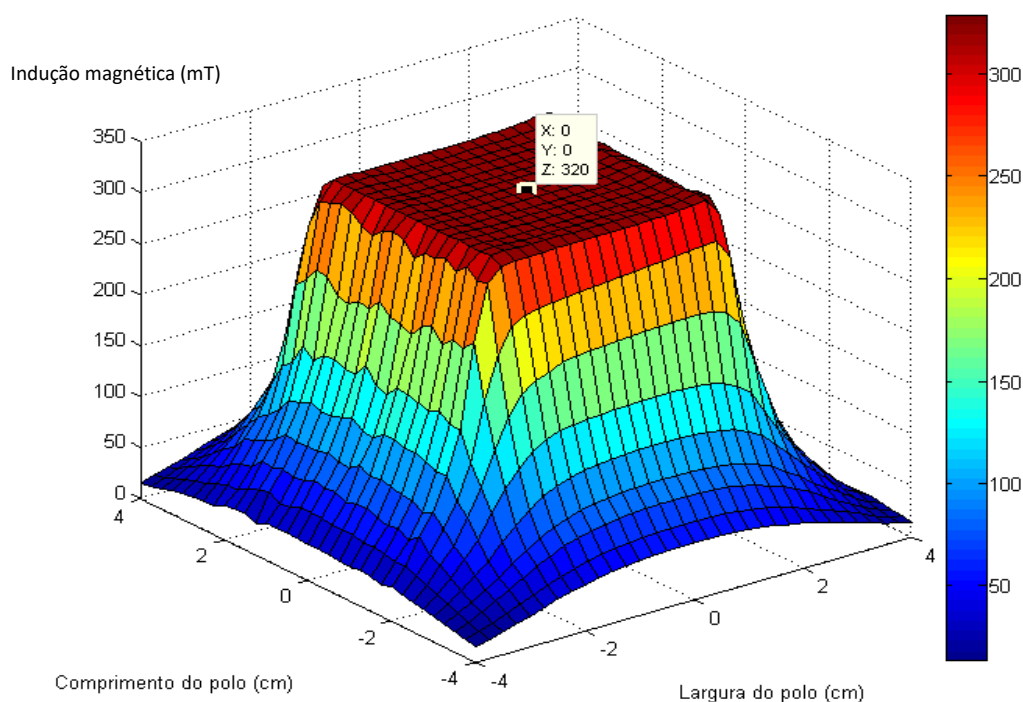


Figura 6.9 – Distribuição da indução magnética na camada  $z = -5,5 \text{ mm}$  – resultado experimental.

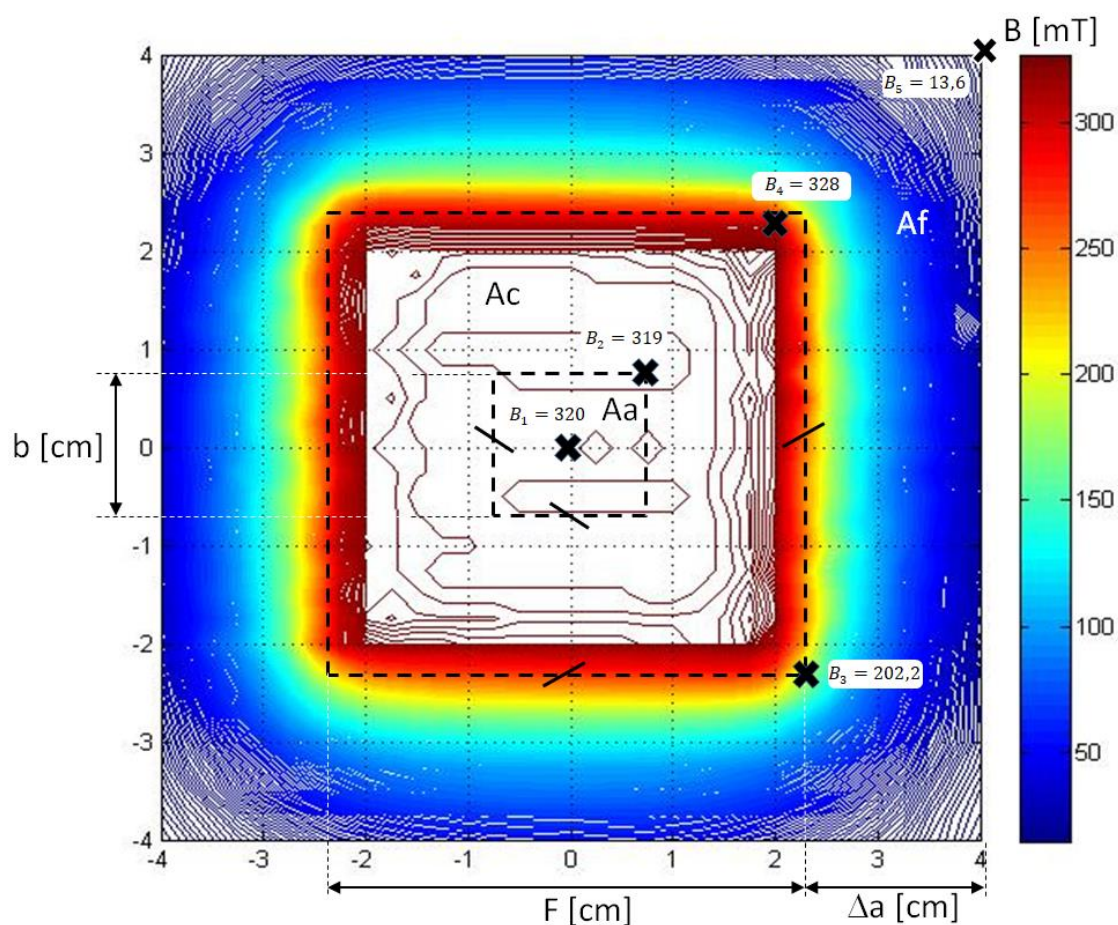


Figura 6.10 – Curva de nível da distribuição da indução magnética na camada  $z = -5,5 \text{ mm}$  – resultado experimental.

Pelos ensaios comprava-se a existência da simetria do campo. No entanto, a análise não é feita em apenas  $\frac{1}{4}$  da camada porque o ensaio é feito com um número limitado de pontos. Para determinar a homogeneidade para o pior caso medido utiliza-se toda a camada.

Pode-se verificar que os valores mínimos em cada área são obtidos nos seus cantos pois estão mais distantes do centro. Verifica-se também que na zona onde a amostra é inserida a variação do campo é muito baixa pois tem poucas curvas de nível, sendo que o valor de indução é igual ao valor nominal. Seria espectável, pelo efeito de franja, que o ponto máximo fosse obtido no centro  $(x, y) = (0, 0)$ . A concentração do fluxo nos cantos dos polos faz com que isto não se verifique em camadas perto das superfícies dos polos. Ainda assim, no centro do entreferro,  $(x, y) = (0, 0)$ , pode-se verificar que a indução é constante ao longo do eixo  $z$ . Na tabela 6.2 resumem-se os valores máximos e mínimos por área e camada.

Tabela 6.2 – Valores máximos e mínimos.

Cota $z$ [mm]	Área	Maior [mT]	Menor [mT]
<b>-5,5</b>	<b>Polo + franja</b>	328	13,6
	<b>Polo</b>	328	202,2
	<b>Amostra</b>	320	319
<b>0</b>	<b>Polo + franja</b>	319	13,64
	<b>Polo</b>	319	180
	<b>Amostra</b>	319	318
<b>7,5</b>	<b>Polo + franja</b>	404	12,2
	<b>Polo</b>	404	168,1
	<b>Amostra</b>	319	319

Para quantificar a homogeneidade nos volumes  $V_a$  e  $V_c$ , apresenta-se a tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Homogeneidade nos volumes.

<b>B nominal = 319 mT</b>	
<b>Volume</b>	<b><math>\Delta B / B_0</math> [%]</b>
$V_a$	0,63
$V_c$	46,39

Conclui-se que a homogeneidade no  $V_a$  é aproximadamente 73 vezes superior à homogeneidade no  $V_c$ .

Note-se que para o volume foi considerada a simetria do campo, admitindo que a camada  $z = 5,5$  mm seria igual à camada  $z = -5,5$  mm. Esta condição foi verificada experimentalmente, sendo feita uma medição da indução magnética ao longo do eixo  $z$ , de acordo com a tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Indução magnética ao longo do eixo  $z$  ( $I = 1$  A)

<b><math>z</math> (mm)</b>	<b><math>B</math> (mT)</b>
-7,5	34,5
-5,5	39,8
-3,5	42,6
-1,5	44,1
1,5	44
3,5	42,8
5,5	39,6
7,5	35,7

### 6.3. Compensação do campo residual

Em vista a caracterização deste eletromagneto, o ensaio para a compensação do campo residual foi feito para uma corrente de 3 A, sendo a medição do campo feita no centro do entreferro. O ensaio da indução máxima foi feito com as ligações das bobinas de forma aditiva e subtrativa, apresentando-se os resultados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Medição do campo no método aditivo e subtrativo.

Ensaio B máx ( $I = 3\text{ A}$ )					
Montagem aditiva		B [ mT ]	Montagem subtrativa		B [ mT ]
2 Bobines	B1, B6	106,8	2 Bobines	B1, B6	-0,015
	B2, B5	106,7		B2, B5	-0,048
	B3, B4	106,8		B3, B4	-0,090
4 Bobines	B1, B2, B5, B6	213,8	4 Bobines	B1, B2, B5, B6	-0,070
	B2, B3, B4, B5	214,2		B2, B3, B4, B5	-0,090
	B1, B3, B4, B6	214,2		B1, B3, B4, B6	0,038
6 Bobines	Todas	320,0	6 Bobines	Todas	0,170

Como se pode observar na tabela 6.5, apesar da variação da indutância das bobinas com a sua posição relativa nas pernas centrais do núcleo, a indução no entreferro não depende da posição das bobinas associadas. Através deste ensaio também se comprova a simetria das bobinas principais, pelo que na montagem subtrativa a indução é praticamente nula.

O campo residual resultante de cada associação de bobinas, após a anulação da corrente de 3 A, é apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Campo residual.

B residual		
Montagem aditiva		Br [ mT ]
2 Bobines	B1, B6	0,840
	B2, B5	0,840
	B3, B4	0,840
4 Bobines	B1, B2, B5, B6	0,890
	B2, B3, B4, B5	0,810
	B1, B3, B4, B6	0,920
6 Bobines	Todas	0,915

Conclusão: Como se pode observar, esta montagem apresenta campo residual, para qualquer uma das configurações. De forma a majorar a compensação deste campo, é necessária uma corrente de 13 mA nas bobinas de compensação, de acordo com o circuito equivalente apresentado no ponto 3.3.1. No ensaio foram necessários 15 mA para anular a corrente, devendo a corrente ser ajustada a este valor.

### 6.4. Fator de franja

Na tabela 6.7 apresenta-se o fator de franja obtido experimentalmente e simulado através do FEMM, bem como os valores dos cálculos necessários para a sua determinação.

Tabela 6.7 – Fator de franja.

	Polo	Entreferro						Franja								
	Lg (cm)	Lpólo/2 (m)	Bgmax (T)	Bgmed (T)	$\phi_g$ (Wb)	Lg (m)	Ac (m2)	Bmed (entreferro+franja) (T)	$\phi_T$ (Wb)	AT (m2)	Bf_med (T)	dx (m)	$\Delta a$ 10%Bmax (m)	Af (m2)	lf (m)	Ff
FEMM -->	1.5	0.0225	0.3278	0.3198	0.0006	0.015	0.002	0.2366	0.0015	0.0064	0.1981	0.03997	0.01747	0.0044	0.0242	2.34
Real -->	1.5	0.0225	0.3190	0.3074	0.0006	0.015	0.002	0.2234	0.0014	0.0064	0.1845	0.04	0.0175	0.0044	0.0250	2.30

Como se pode observar na tabela 6.7, o fator de franja obtido por simulação é aproximado do fator de franja obtido experimentalmente (~1,7%), para o entreferro de 1,5 cm.

## 6.5. Ventilador

De forma a perceber como poderia ser feito o posicionamento do ventilador no interior do magneto foram realizados alguns testes, com a alimentação definida de 24 V DC, ilustrados na Figura 6.11.

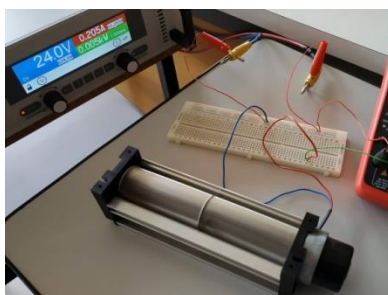


Figura 6.11 – Teste ao ventilador – sem restrições.

No funcionamento sem qualquer restrição o ventilador “consome” 205 mA, sendo o valor nominal 255 mA, Figura 6.11. Quando lhe foi posta uma conduta, separando a entrada de ar da saída, a corrente aumentou ligeiramente para 217 mA, anexo XI – a). Sendo a entrada de ar obstruída, o ventilador perde força e a corrente baixa (no ensaio para 150 mA), anexo XI – b). No anexo XI – c) ilustra-se a abertura da entrada de ar necessária para que o ventilador não perca força (204 mA), ficando definido que a área da entrada de ar deveria ser aproximadamente igual à área do rotor do ventilador (vista superior – 30,5 x 148,5 mm). A abertura no painel foi feita numa área de 50 x 148,5 mm pois foram abertos furos em vez da área toda, de forma a compensar a grelha. Passando ao teste de obstrução na saída de ar, o impacto de um objeto paralelo à saída (como a tampa do espectrómetro), a 6 cm, baixa a corrente para 192 mA, anexo XI – d). O mesmo objeto a 4 cm baixa a corrente para 187 mA, anexo XI – e). A partir desta distância a corrente começa a baixar consideravelmente mais, baixando para 169 mA a 2 cm, anexo XI – f). Com este ensaio definiu-se que não deveria haver uma obstrução na saída do ventilador a menos de 4 cm para não reduzir significativamente o seu desempenho.

Nota: Estes testes não substituem o teste ao ventilador instalado dentro do magneto.

# Capítulo 7

## Conclusões

Neste Capítulo serão apresentadas conclusões, os comentários finais e as perspetivas de trabalhos futuros.

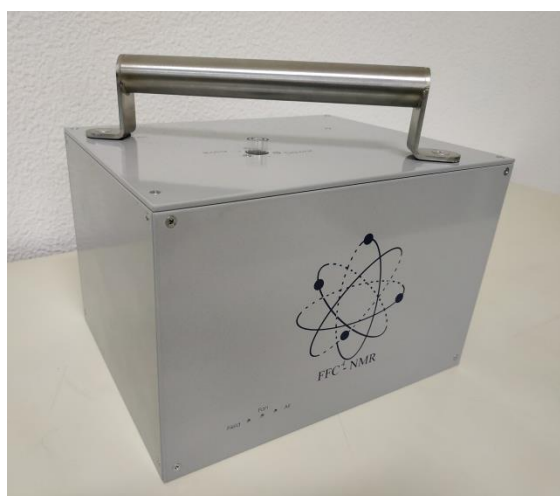
## 7.1. Comentários finais

Os principais objetivos da dissertação consistiram no auxílio da caracterização do eletromagneto através de simulações e ensaios experimentais e no projeto do magneto.

O espectrómetro de RMN de CCR no IST tem vindo a evoluir ao longo de quase 25 anos, até à versão RMN-CCR<sup>4</sup> do presente trabalho. Deste trabalho resultou um protótipo do magneto de RMN-CCR<sup>4</sup>, que apresenta aspetos melhorados relativamente às versões anteriores.

Um dos principais aspetos desenvolvidos foi o *design*. Foi desenvolvido um magneto de dimensão reduzida (largura 262,12 mm x altura 173,25 mm (sem pés) x profundidade 205,72 mm), sendo o seu peso também reduzido, o que lhe confere uma melhor portabilidade. O projeto do protótipo foi realizado com a ambição de tornar o produto industrializável pelo que, para além do aspeto estético, foi tido em consideração o processo de montagem e de manutenção e a robustez do magneto. Assim, foram introduzidas algumas características novas, face às versões anteriores, como fichas com fixação mecânica para melhorar ruídos e maus contactos, funções de segurança, sinalética e uma pega para melhorar a portabilidade. Isto sem prejuízo das funções já adquiridas nas versões anteriores. A versão desenvolvida no âmbito desta tese, comparando com a versão RMN-CCR<sup>2</sup>, permitiu também melhorar o circuito de passagem de ar, incorporando a resistência de aquecimento no interior do magneto.

Comparativamente com a versão anterior, a corrente do eletromagneto foi reduzida 40% e o campo magnético nominal máximo aumentado 52%. A redução da corrente leva a um consumo menor de energia, sendo o magneto mais eficiente. A utilização de um magneto com uma corrente baixa permite um sistema de arrefecimento mais simples. É mais robusto, pelo que deverá necessitar de menos manutenção e deverá ser mais barato, quer em termos de custo inicial como de funcionamento. Na Figura 7.1 ilustra-se o magneto de RMN-CCR<sup>4</sup>.



a) Vista de frente.



b) Vista de trás.

Figura 7.1 - Magneto de RMN-CCR<sup>4</sup>.



O elemento principal na constituição do magneto é o eletromagneto, que tem a capacidade para operar numa gama de 0 a 0,32 T, até 3 A, com uma homogeneidade do campo magnético muito elevada na zona onde a amostra é inserida.

Para a caracterização do eletromagneto, foi inicialmente estudado o efeito de franja com recurso a uma simulação bidimensional, obtida com o programa FEMM. Não havendo a possibilidade de testar eletromagnetos semelhantes, com larguras de entreferro diferentes, esta simulação não foi verificada experimentalmente, da qual se pode perceber que a distribuição da indução magnética na zona da amostra é praticamente uniforme. De forma a analisar esta distribuição com maior detalhe foi feita uma simulação do eletromagneto em COMSOL Multiphysics, fazendo a sua representação tridimensional, da qual foi possível quantificar a homogeneidade nos volumes da amostra e do entreferro. A distribuição foi medida experimentalmente, com resultados muito semelhantes aos obtidos através da simulação. Ainda para caracterizar o eletromagneto foi determinada a indutância das bobinas, individualmente e associadas, através de ensaios experimentais. Foi também determinada a indutância de dispersão, representando cerca de 35 % da indutância total das bobinas principais (548,6 mH – método de ressonância). Apresenta mais fluxo de dispersão que a versão anterior, sendo uma das desvantagens da redução do volume do núcleo.

O resultado deste trabalho foi publicado no artigo “*Temperature distribution of a Fast-Field Cycling Nuclear Magnetic Resonance relaxometer’s electromagnet with reduced volume*” [25], tendo sido divulgado o magneto e, em particular, o eletromagneto.

## 7.2. Perspetivas de trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram surgindo ideias que podem ser utilizadas para melhorar o magneto desenvolvido e a sua caracterização, das quais se destacam:

- Realização de testes:
  - Medição da temperatura de funcionamento do eletromagneto e circuito de passagem de ar pela amostra, validando a eficiência dos isolamentos térmicos e do sistema de ventilação;
  - Projetar e testar o circuito de RF, dado que futuramente se se pretender utilizar a indução máxima do eletromagneto, é necessário adaptar a frequência de ressonância, pelo que é necessário garantir que o circuito ressonante também pode ser ajustado;
  - Verificar se a fixação da bobina com teflon afeta as medições de amostras com teflon;
  - Validar teste de funcionamento do ventilador, garantindo que este opera perto do seu valor nominal para que este possa ter uma maior longevidade;
  - Verificar eficiência da caixa de blindagem na mitigação do ruído, de forma

a validar se o investimento nesta caixa se justifica;

- Conjugação do magneto e da fonte de alimentação adaptada para esta versão do magneto (incluindo a adaptação da fonte de tensão auxiliar, uniformidade das fichas de ligação entre os dois componentes do espectrómetro e a substituição do sensor *hall* para um sensor com uma gama de medição superior);
- Aperfeiçoar o designe de algumas peças:
  - Introduzir um batente no suporte do Dewar (na entrada do tubo de vidro que liga à resistência) para não deixar enfiar demais o tubo de vidro, tapando o furo para o termopar. Isto pode ser feito fazendo duas furações com diâmetros diferentes em vez de uma única furação;
  - Pode ser feita a sinalética com acrílico na furação do painel frontal para melhorar a estética do magneto, conferindo um aspeto mais robusto;
  - Tendo como objetivo a redução de custos de produção, o tubo de cobre soldado à resistência pode ser vincado num dos lados, em vez de ter uma tampa soldada. Também se pode substituir algumas das peças em alumínio por plástico PLA ou ABS (impressão 3D), tais como o bloco do pilar 4 e os suportes dos LED's, do sensor de fluxo e dos dados de ligação do eletromagneto;
  - Deixar folgas entre os pilares e os limites da base do magneto (adaptação nas furações) para que estes não fiquem a fazer pressão nos painéis laterais devido a pequenos erros de maquinação.
- Melhorar a arrumação dos fios no magneto através de caminhos de fios, o que deve ser previsto antes da montagem das peças;
- Pode-se melhorar a eficiência do arrefecimento do eletromagneto se se colocar um isolante à volta do núcleo do eletromagneto, tapando a folga existente, o que força o ar a circular pelo centro do núcleo;
- Estudar a hipótese de remover o tubo de vidro exterior do Dewar, de forma a ganhar espaço para o sensor *hall* ser colocado exatamente no centro do entreferro.



# Bibliografia

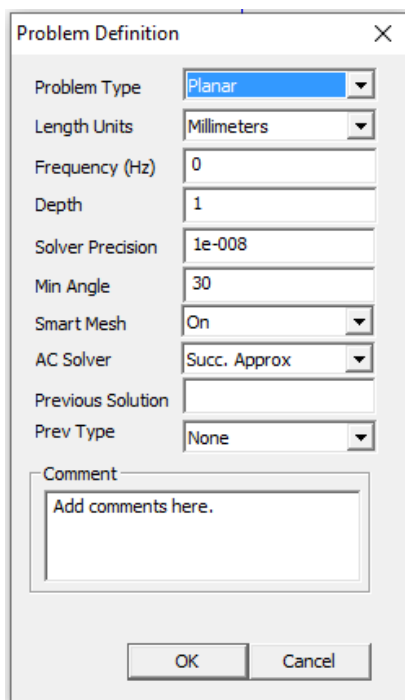
- [1] Martin Townsend, "Superconducting magnets: The heart of NMR", Ingenia, 2004;
- [2] Bruker, "Bruker Announces World's First 1.2 GHz High-Resolution Protein NMR Data", EUROISMAR, 2019;
- [3] Rafaela Pinto, "Segmentação Automática de Lesões de Esclerose Múltipla em Imagens de Ressonância Magnética", 2017;
- [4] António Roque, "Espectrómetro de RMN de CCR com utilização de supercondutores no magneto", 2014;
- [5] Duarte Mesquita Sousa, Gil Domingos Marques, José Manuel Cascais, Pedro José Sebastião, "Desktop fast-field cycling nuclear magnetic resonance relaxometer", Elsevier, 2010;
- [6] Pedro Videira, "Fast-Field Cycling Nuclear Magnetic Resonance relaxometer's magnet with optimized homogeneity and reduced volume", 2017;
- [7] Veeman, W. S.: "Nuclear magnetic resonance, a simple introduction to the principles and applications" Elsevier, Goderma 80, pp. 225-242, 1997;
- [8] <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/geofisica/geomagnetismo/index.html>, nov. 2019;
- [9] Alessandro A Mazzola, "Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional", Revista Brasileira de Física Médica, 2009;
- [10] CHRISTOPHER P. LANDEE\* and MARK M. TURNBULL, "Review: A gentle introduction to magnetism: units, fields, theory, and experimente", Journal of Coordination Chemistry, 2014
- [11] Félix, F. K. C.; Bonfim, P. G. B.; Santos, L. S. S.; Pereira, D. H, "Teoria Quântica: Uma Abordagem Quantizada da sua Evolução – Parte I", Rev. Virtual Química, 2016
- [12] Noack, F.: "NMR Field-Cycling Spectroscopy: Principles and Applications", Progress in NMR Spectroscopy, Vol. 18, pp. 171-276, 1986;
- [13] E. Anoardo, G. Galli, and G. Ferrante, "Fast-Field-Cycling NMR: Applications and Instrumentations", Applied Magnetic Resonance, 2001;
- [14] [http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/flux\\_fringing](http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/flux_fringing), nov. 2019;
- [15] <https://www.altanatubes.com.br/webstore/?c=320&t=Fios-de-cobre-esmaltados-para-bobinas-transformadores-e-indutores>, nov. 2019;
- [16] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html>, nov. 2019;
- [17] [http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/coenergy?s\[\]=flux&s\[\]=linkage](http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/coenergy?s[]=flux&s[]=linkage), nov.

2019;

- [18] [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Book%3A\\_University\\_Physics\\_\(OpenStax\)/Map%3A\\_University\\_Physics\\_II\\_-\\_Thermodynamics%2C\\_Electricity%2C\\_and\\_Magnetism\\_\(OpenStax\)/14%3A\\_Inductance/14.03%3A\\_Self-Inductance\\_and\\_Inductors](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics%2C_Electricity%2C_and_Magnetism_(OpenStax)/14%3A_Inductance/14.03%3A_Self-Inductance_and_Inductors), nov. 2019;
- [19] <http://www.ezuim.com/pdf/lissajous.pdf>, nov. 2019;
- [20] <http://www.magnetic-declination.com/Portugal/Lisbon/2136221.html>, nov. 2019;
- [21] The American Radio Relay League, "The radio amateur's handbook", 1936;
- [22] [https://www.electronics-notes.com/articles/basic\\_concepts/q-quality-factor/basics-tutorial-formula.php](https://www.electronics-notes.com/articles/basic_concepts/q-quality-factor/basics-tutorial-formula.php), nov. 2019;
- [23] <https://biztechbrz.wordpress.com/2011/03/09/correntes-alternadas-anotacoes-aula-17/>, nov. 2019; Tony R. Kuphaldt, "Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC" (6ª ed.), Design Science, 2007;
- [24] <https://www.digikey.com/product-detail/en/honeywell-sensing-and-productivity-solutions/SS94A2D/SS94A2D-ND/2561091>, nov. 2019;
- [25] P. Videira, P. Sebastião, A. Roque, D. M. Sousa, E. Margato: "Temperature distribution of a Fast-Field Cycling Nuclear Magnetic Resonance relaxometer's electromagnet with reduced volume", ICREPQ'20 – International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Espanha, Granada, 02\_04 September, 2020.

# ANEXO I

## *Parâmetros da simulação em FEMM*



Problem Definition

Problem Type: Planar

Length Units: Millimeters

Frequency (Hz): 0

Depth: 1

Solver Precision: 1e-008

Min Angle: 30

Smart Mesh: On

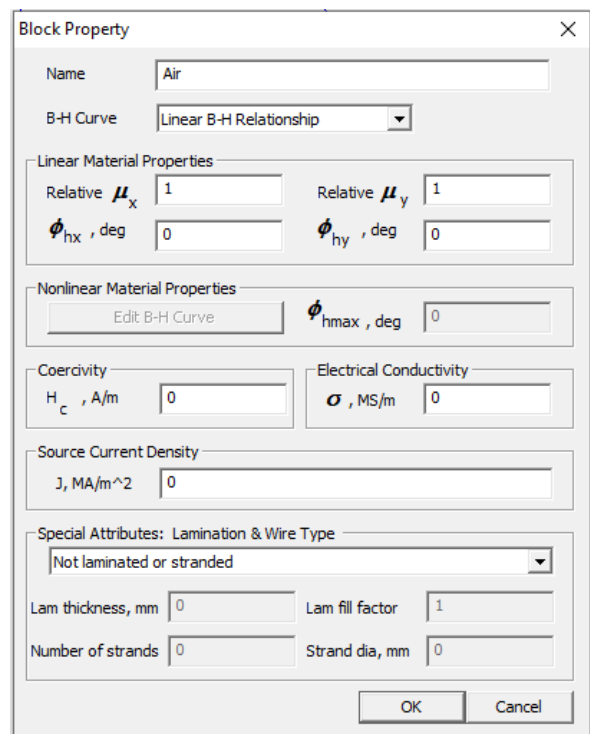
AC Solver: Succ. Approx

Previous Solution:

Prev Type: None

Comment: Add comments here.

OK Cancel



Block Property

Name: Air

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$ : 1

Relative  $\mu_y$ : 1

$\phi_{hx}$ , deg: 0

$\phi_{hy}$ , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve

$\phi_{hmax}$ , deg: 0

Coercivity

$H_c$ , A/m: 0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m: 0

Source Current Density

$J$ , MA/m<sup>2</sup>: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0

Lam fill factor: 1

Number of strands: 0

Strand dia, mm: 0

OK Cancel

Block Property

Name

Copper

B-H Curve

Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$

1

Relative  $\mu_y$

1

$\phi_{hx}$ , deg

0

$\phi_{hy}$ , deg

0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve

$\phi_{hmax}$ , deg

0

Coercivity

$H_c$ , A/m

0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m

58

Source Current Density

J, MA/m<sup>2</sup>

0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm

0

Lam fill factor

1

Number of strands

0

Strand dia, mm

0

OK

Cancel

Block Property

Name

Pure Iron

B-H Curve

Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative  $\mu_x$

14872

Relative  $\mu_y$

14872

$\phi_{hx}$ , deg

0

$\phi_{hy}$ , deg

0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve

$\phi_{hmax}$ , deg

0

Coercivity

$H_c$ , A/m

0

Electrical Conductivity

$\sigma$ , MS/m

10.44

Source Current Density

J, MA/m<sup>2</sup>

0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm

0

Lam fill factor

1

Number of strands

0

Strand dia, mm

0

OK

Cancel

Circuit Property

Name

Coil

Parallel

Series

Circuit Current, Amps

3

OK

Cancel

Properties for selected block

Block type

Copper

Mesh size

5

Let Triangle choose Mesh Size

In Circuit

Coil

Number of Turns

654

Magnetization Direction

0

In Group

0

Block label located in an external region

Set as default block label

OK

Cancel

# ANEXO II

## Cálculos do efeito de franja

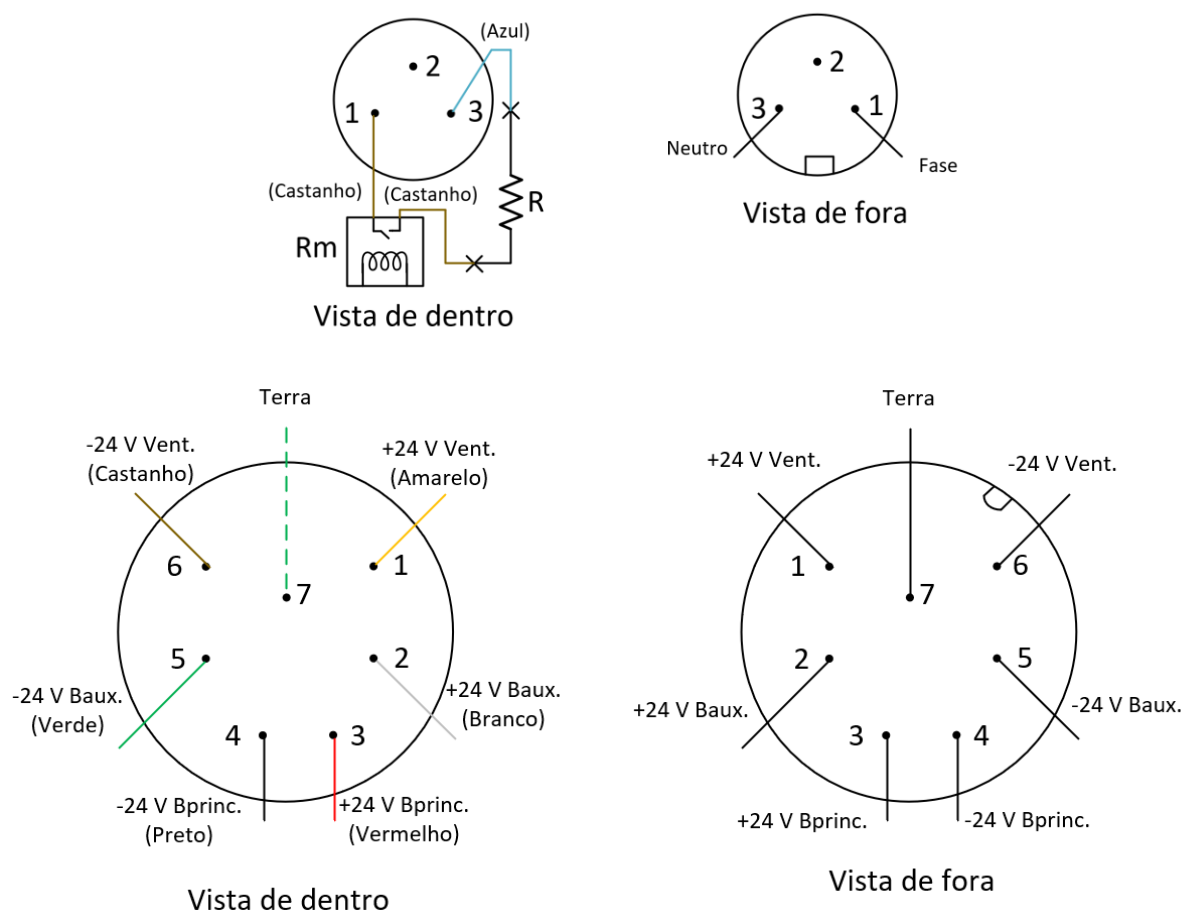
		Bobina		Polo		Entreferro					Franja									
	Lg (cm)	Bbmax (T)	Bbmed (T)	Bpmed (T)	$\phi_p$ (Wb)	Lpólo/2 (m)	Bgmax (T)	Bgmed (T)	$\phi_g$ (Wb)	Lg (m)	Ac (m2)	Bmed (entreferro+franja) (T)	$\phi_T$ (Wb)	AT (m2)	Bf_med (T)	dx (m)	$\Delta a$ 10%Bmax (m)	Af (m2)	If (m)	Ff
Entreferro (largura entre polos = 15 mm)	0									0							0		0	1,00
	0,1	1,8307	1,8271	1,7455	0,0035	0,0225	1,7126	1,6953	0,0034	0,001	0,002	1,5412	0,0042	0,0027	1,0802	0,02599	0,00349	0,0007	0,0016	1,21
	0,2	1,7380	1,7341	1,6290	0,0033	0,0225	1,5389	1,5267	0,0031	0,002	0,002	1,2968	0,0042	0,0032	0,9164	0,0285	0,006	0,0012	0,0033	1,36
	0,3	1,6151	1,6111	1,4959	0,0030	0,0225	1,3645	1,3546	0,0027	0,003	0,002	1,0965	0,0041	0,0037	0,7917	0,03058	0,00808	0,0017	0,0051	1,50
	0,4	1,4427	1,4389	1,3222	0,0027	0,0225	1,1699	1,1613	0,0024	0,004	0,002	0,9089	0,0039	0,0043	0,6796	0,03261	0,01011	0,0022	0,0068	1,64
	0,5	1,2429	1,2388	1,1119	0,0023	0,0225	0,9720	0,9639	0,0020	0,005	0,002	0,7381	0,0035	0,0047	0,5669	0,03426	0,01176	0,0027	0,0085	1,78
	0,6	1,0816	1,0732	0,9255	0,0019	0,0225	0,8158	0,8080	0,0016	0,006	0,002	0,6091	0,0031	0,005	0,4747	0,03544	0,01294	0,0030	0,0102	1,87
	0,7	0,9836	0,9483	0,7996	0,0016	0,0225	0,7002	0,6924	0,0014	0,007	0,002	0,5172	0,0027	0,0053	0,4089	0,0364	0,0139	0,0033	0,0119	1,95
	0,8	0,8798	0,8520	0,7122	0,0014	0,0225	0,6131	0,6054	0,0012	0,008	0,002	0,4495	0,0025	0,0055	0,3582	0,03702	0,01452	0,0035	0,0135	2,01
	0,9	0,7972	0,7763	0,6434	0,0013	0,0225	0,5453	0,5376	0,0011	0,009	0,002	0,3976	0,0023	0,0057	0,3196	0,03763	0,01513	0,0036	0,0151	2,07
	1	0,7348	0,7149	0,5867	0,0012	0,0225	0,4911	0,4833	0,0010	0,01	0,002	0,3571	0,0021	0,0059	0,2913	0,03844	0,01594	0,0039	0,0166	2,16
	1,1	0,6845	0,6637	0,5387	0,0011	0,0225	0,4466	0,4388	0,0009	0,011	0,002	0,3235	0,002	0,0061	0,2658	0,03896	0,01646	0,0040	0,0182	2,21
	1,2	0,6432	0,6204	0,4996	0,0010	0,0225	0,4095	0,4016	0,0008	0,012	0,002	0,2962	0,0018	0,0061	0,2437	0,03902	0,01652	0,0041	0,0198	2,22
	1,3	0,6081	0,5837	0,4673	0,0009	0,0225	0,3781	0,3702	0,0007	0,013	0,002	0,2731	0,0017	0,0062	0,2255	0,03923	0,01673	0,0041	0,0213	2,24
	1,4	0,5772	0,5514	0,4395	0,0009	0,0225	0,3512	0,3432	0,0007	0,014	0,002	0,2535	0,0016	0,0063	0,2111	0,03971	0,01721	0,0043	0,0228	2,30
	1,5	0,5499	0,5228	0,4160	0,0008	0,0225	0,3278	0,3198	0,0006	0,015	0,002	0,2366	0,0015	0,0064	0,1981	0,03997	0,01747	0,0044	0,0242	2,34
Real	1,5	-	-	-	-	0,0225	0,3190	0,3074	0,0006	0,015	0,002	0,2234	0,0014	0,0064	0,1845	0,04	0,0175	0,0044	0,0250	2,30



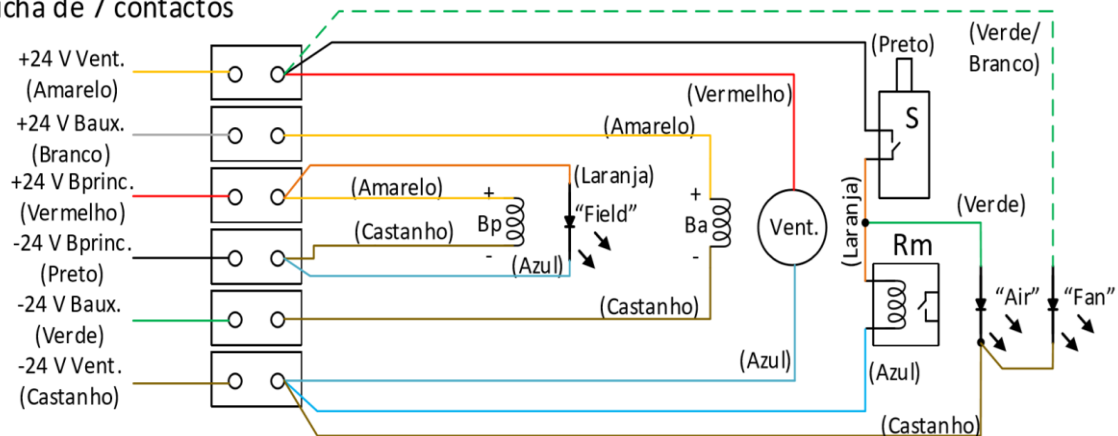
# ANEXO III

## Pinout fichas 3, 7 contactos e DB9

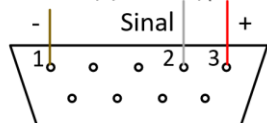
Neste anexo encontra-se o *pinout* da ficha de 3 contactos para alimentação da resistência elétrica (BINDER – 09-0977-00-03), o *pinout* da ficha de 7 contactos para a alimentação da ventoinha, das bobinas principais e das bobinas auxiliares (Neutrik – NC7MD-LX) e o *pinout* da ficha DB9 (MULTICOMP – MC000963) para a alimentação e o sinal do sensor *hall*.



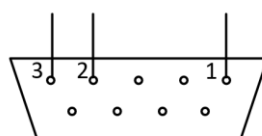
Da ficha de 7 contactos



(Castanho) (Branco) (Vermelho)



Vista de dentro



Vista de fora

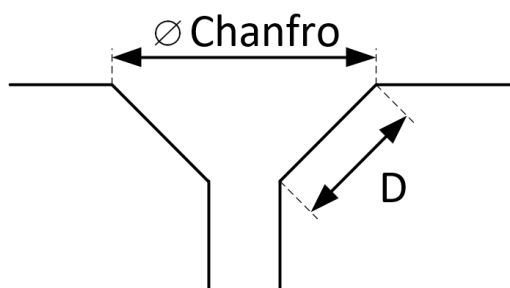


# ANEXO IV

## Desenhos técnicos

Neste anexo encontram-se os desenhos técnicos das peças produzidas. Apresenta-se a regra utilizada para a furação na tabela seguinte, com a ilustração das variáveis na Figura seguinte.

Furação		
Tipo de furo	M3 [mm]	M6 [mm]
Passante	Ø 3,3	Ø 6,4
Roscado	Ø 2,53	Ø 5,36
Embutir (Angulo 45°)	Ø Chanfro = 5,9	Ø Chanfro = 11,9
	D = 1,3	D = 2,75

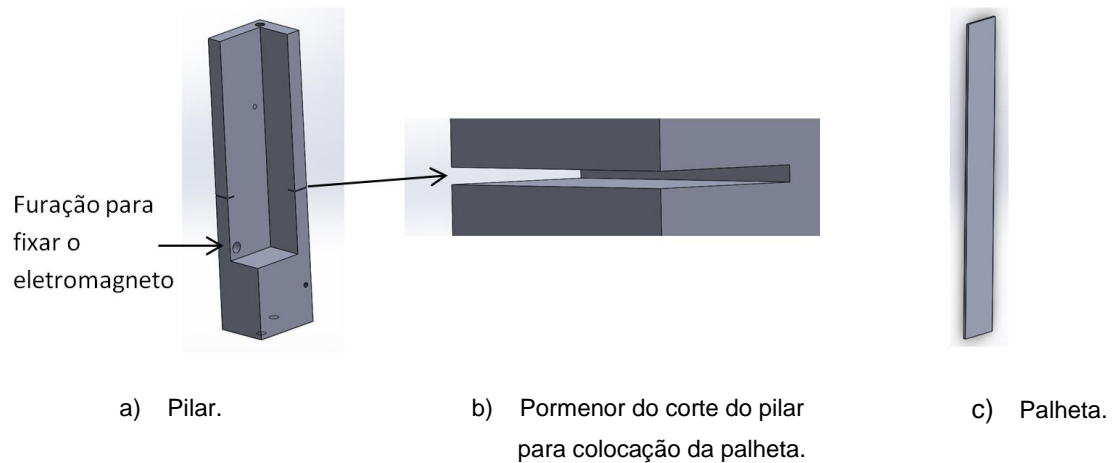


NOTA: PÁGINAS DE DESENHOS TÉCNICOS.

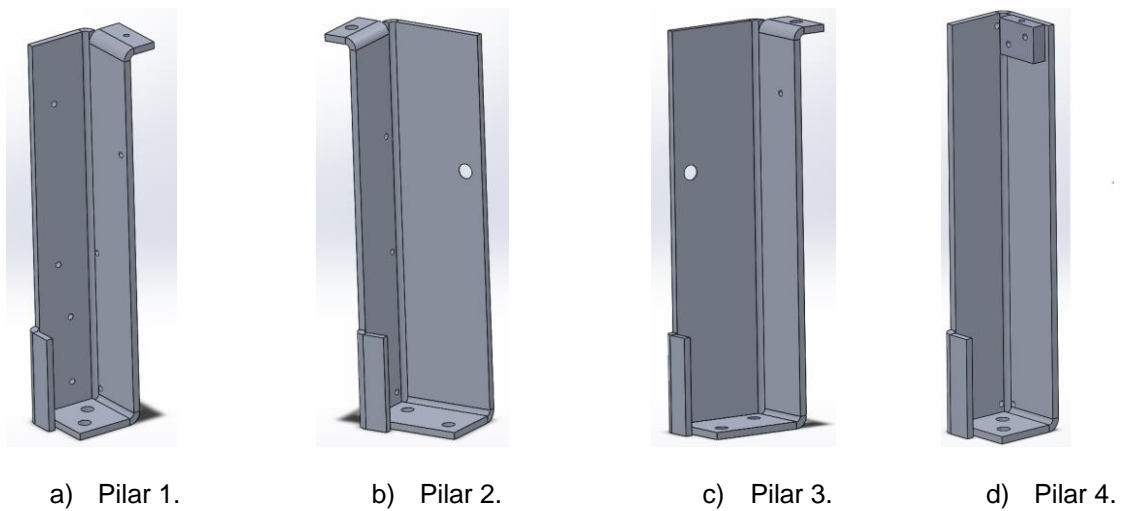
# ANEXO V

## Esboços e peças do magneto

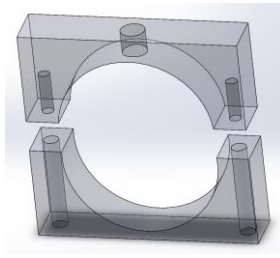
### a) Versão preliminar dos pilares.



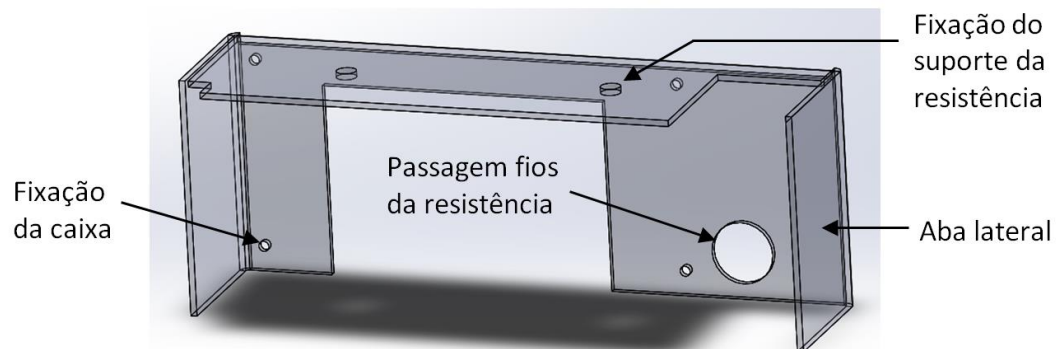
### b) Pilares do eletromagneto.



c) Abraçadeira para fixação da resistência com isolamento.



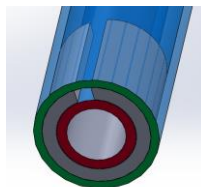
d) Caixa da resistência.



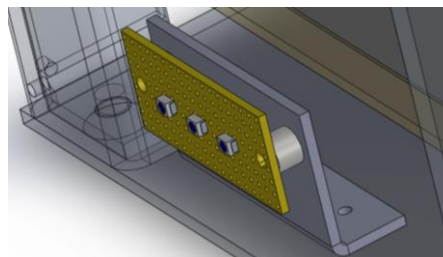
e) Tubo de vidro.



f) Anilha de teflon no Dewar.



g) Suporte da PCB dos LED's.



h) Palhetas para as bobinas (mm) – 2 mm espessura.



a) Palheta para bobinas principais.

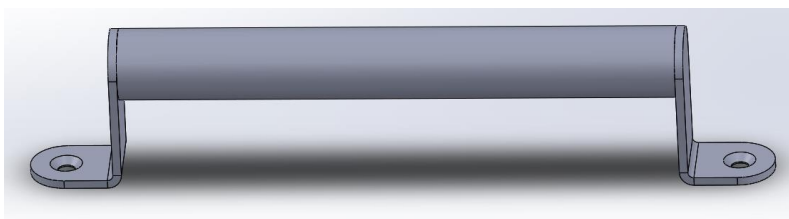


b) Palheta para bobinas auxiliares.

i) Pega.



a) Pega – Versão 1.



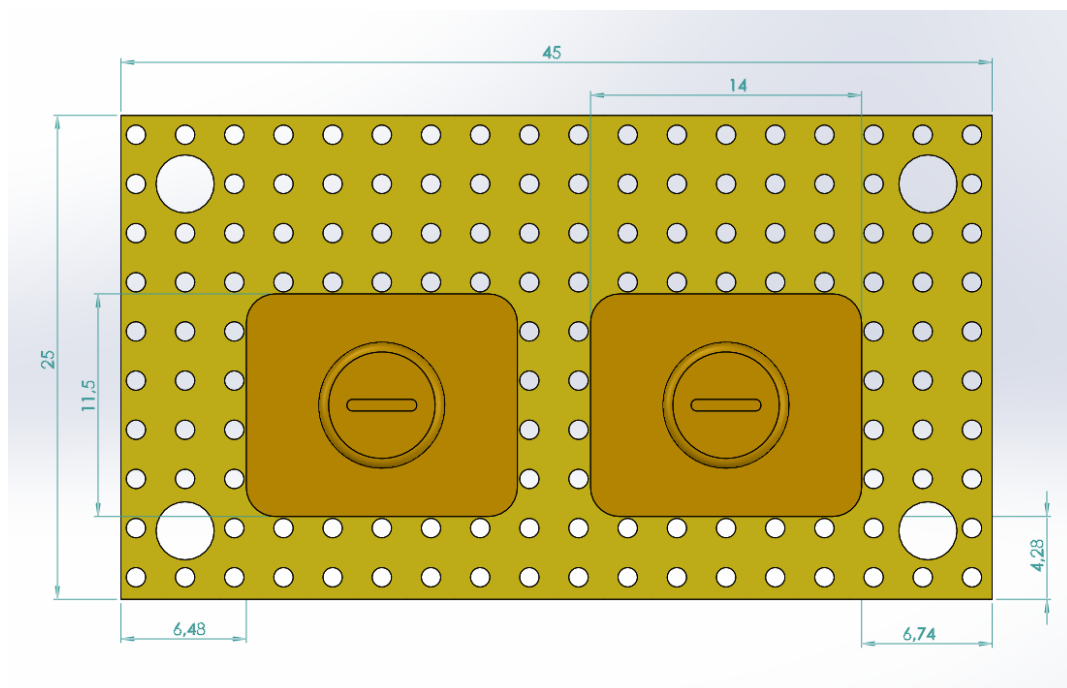
b) Pega – Versão 2.



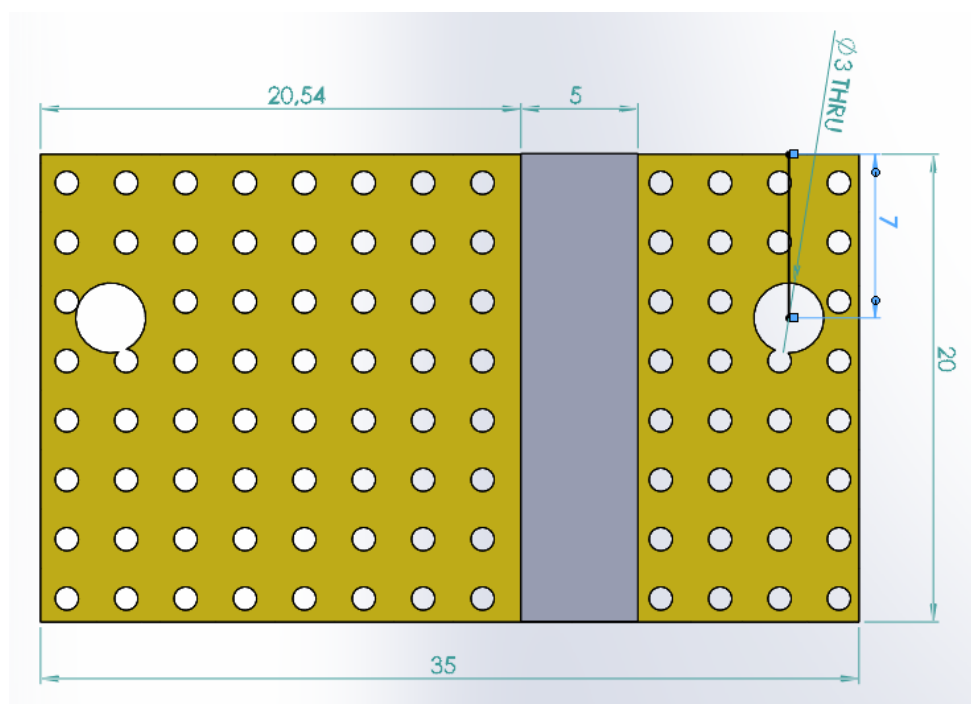
# ANEXO VI

## Dimensões do núcleo ferromagnético

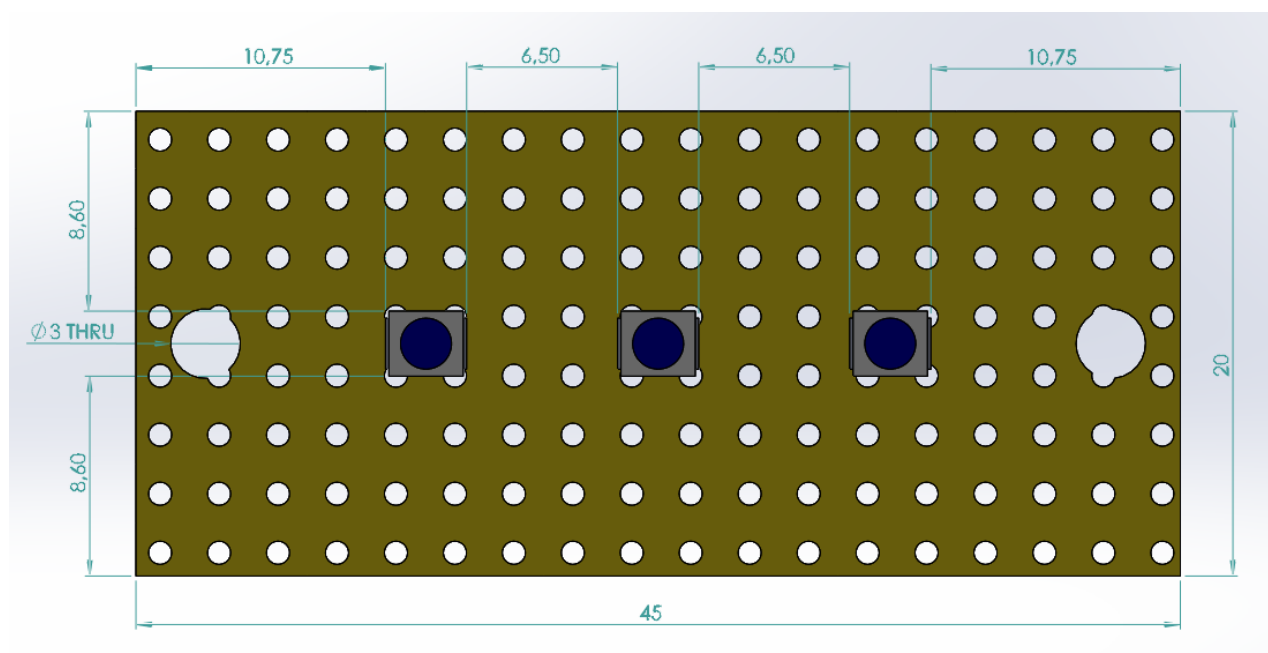
PCB para o circuito de prova (mm)



PCB para o relé (mm)



PCB para os LED's (mm)

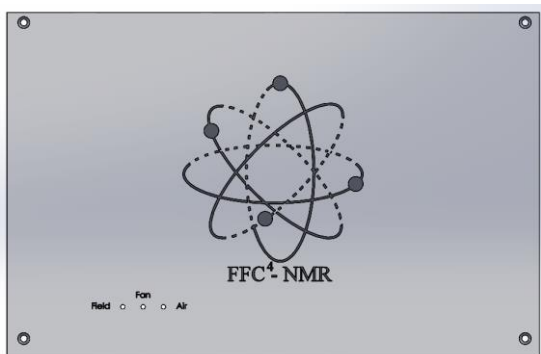




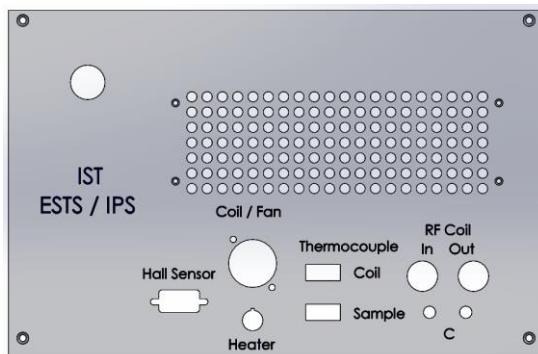
# ***ANEXO VII***

## **Painéis da caixa do magneto**

Neste anexo ilustram-se os 6 painéis da caixa do magneto de RMN de CCR utilizados no protótipo criado.



a) Painel frontal.

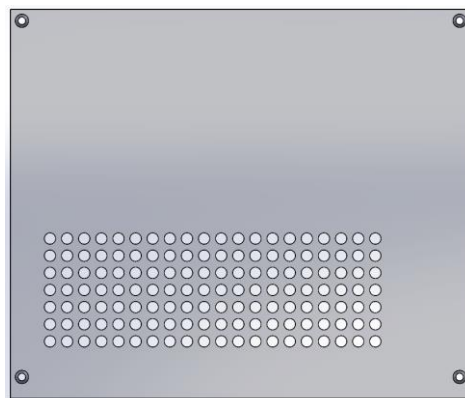


Nota:  
In ⇔ Tx  
Out ⇔ Rx

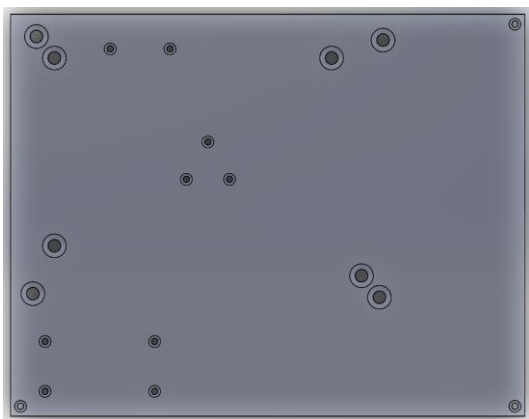
b) Painel traseiro.



c) Painel lateral esquerdo.



d) Painel lateral direito.



e) Base.



f) Tampa.

# ANEXO VIII

## Lista das peças criadas

Lista de peças					
	Peça	Material	Descrição	Quantidade	Nome do ficheiro do desenho
Varisom	Pilar 1	Alumínio	Pilar para o núcleo	1	Peça18_pilar1
	Pilar 2	Alumínio	Pilar para o núcleo	1	Peça19_pilar2
	Pilar 3	Alumínio	Pilar para o núcleo	1	Peça20_pilar3
	Pilar 4	Alumínio	Pilar para o núcleo	1	Peça21_pilar4
	Bloco	Alumínio	Bloco para pilar 4	1	Peça22_pilar4_chapa6mm
	Anilha	Alumínio	Anilha de suporte de o'ring	1	Peça6_caixa_tampa_chapa
	Tampa caixa	Alumínio	Tampa da caixa de blindagem RF	1	Peça16_caixa_blindada_tampa
	Suporte sensor	Alumínio	Suporte sensor fluxo	1	Peça1_flowSwitch_suporte
	Caixa resistência	Alumínio	Caixa resistência	1	Peça17_caixaR2
	Suporte LED's	Alumínio	Suporte LED's	1	Peça2_suporte_LED2
	Conduta	Alumínio	Conduta ventilador	1	Peça3_ventilador_Conduta3_sheetmetal
	Painel frontal	Alumínio	Painel frontal	1	Peça13_caixa_painel_frente
	Painel traseiro	Alumínio	Painel traseiro	1	Peça14_caixa_painel_tras
	Painel lateral direito	Alumínio	Painel lateral direito	1	Peça11_caixa_painel_lateral_direito
	Painel lateral esquerdo	Alumínio	Painel lateral esquerdo	1	Peça9_caixa_painel_lateral_esquerdo
	Base	Alumínio	Base	1	Peça12_caixa_base
	Tampa	Alumínio	Tampa	1	Peça10_caixa_tampa
	Pilar caixa	Alumínio	Pilares para os painéis da caixa	3	Peça5_caixa_suporte_furacao_ajustada
	Pega	Al/Inox	Pega da caixa	1	Peça25_caixa_handle_V2
LabVidros (NOF)	Tubo de vidro	Vidro	Ligação da resistência ao suporte Dewar	1	(Sem nome - guardado na assembly)
	Dewar	Vidro	Tubos para bobina RF	1	Part15_tubo_suporte
LabMec IPS	Caixa	Alumínio	Caixa de blindagem RF	1	Peça15_caixa_blindada
LabMec IST (NOF)	Suporte Dewar	Cerâmica	Suporte para Dewar	1	Peça23_suporte_tubos
	Tubo de cobre	Cobre	Ø 13 mm interiores x 47 mm (com tampa)	1	Peça4_lcopper
	Anilha cortada	Teflon	Anilha para interior do Dewar	1	Peça24_tubo_tampa
Innovation Lab IPS	Abraçadeira parte 1	PLA	Suporte resistência (Parte superior)	2	Peça7_suporteR
	Abraçadeira parte 2	PLA	Suporte resistência (Parte inferior)	2	Peça8_suporteR_2
	Palheta grande	ABS	45 x 15 x 2 mm	4	Palhetas_bobinas_nucleo_45x15x2_mm
	Palheta pequena	ABS	45 x 5 x 2 mm	2	Palhetas_bobinas_nucleo_45x5x2_mm
Contactos		Endereço		Telefone	
Varisom-controlo Electrónico, Lda		Elospark, Edifício 17, Algueirão, 2725-193 Mem Martins		219 267 210	
Núcleo de oficinas IST (NOF)		Avª Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa		218419370	



# ANEXO IX

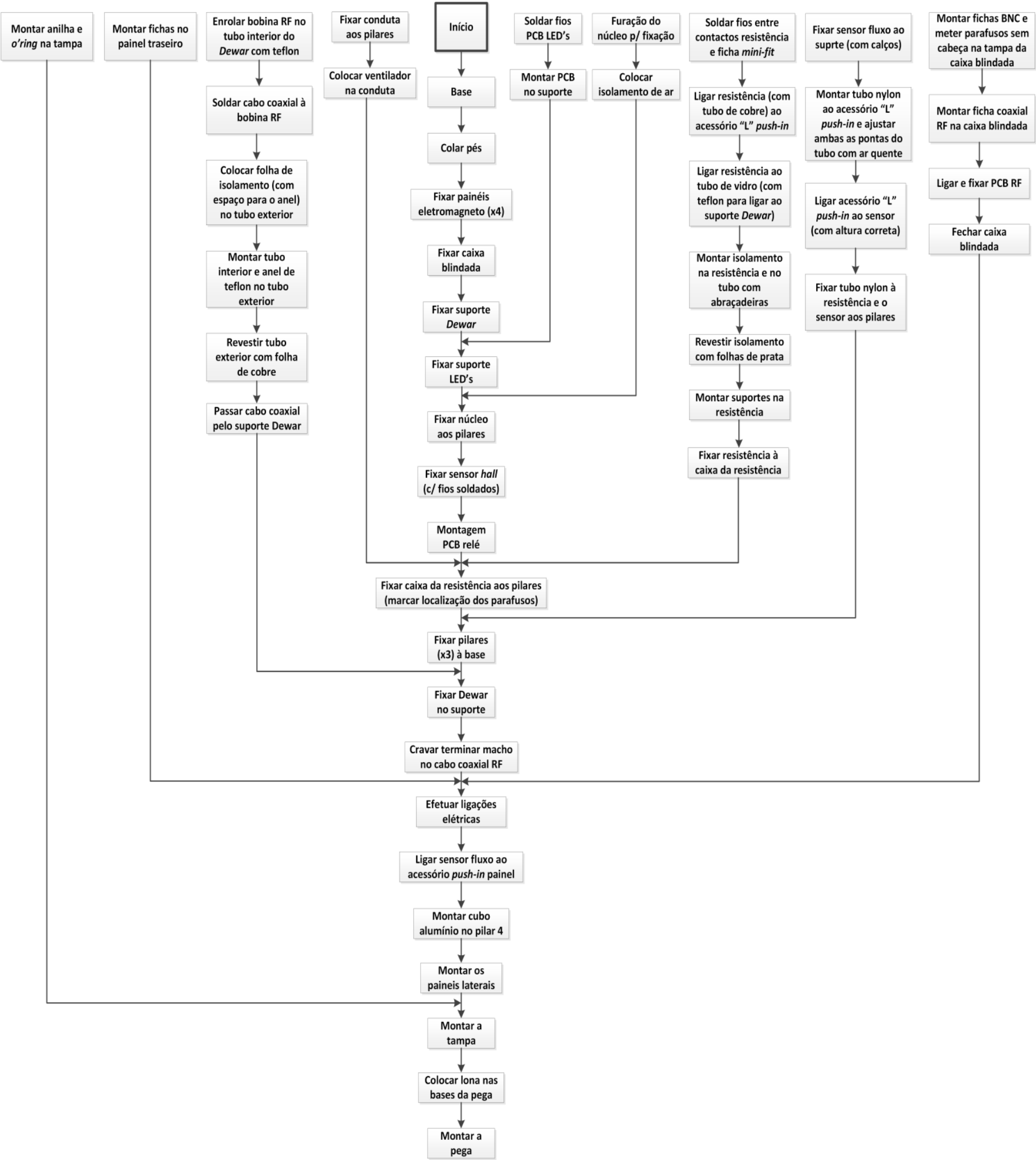
## Lista de material

	Lista de material					
	Designação	Marca	Modelo	Ref.	Quantidade	Distribuidor
Circuito Prova	Diodo	ON SEMICONDUCTOR	1N4148PH / 1N4448TR	Farnell (9843698)	2	Farnell
	Conector BNC	RS	Macho / Painei	RS (546-4487)	2	RS
	Fio cobre esmaltado	-	Ø 0,27 mm	-	2 m	-
	Condensador variavel RF	Vishay	BFC280907015	RS (378-906)	2	RS
	Bloco terminal 2 contactos (PCB)	CAMDENBOSS	CTB0308/2	Farnell (3882652)	1	Farnell
	Conector BNC Macho / Cabo	Radiall	R113182000W	RS (245-5042)	1	RS
	Conector BNC Fêmea / Painei	TE Connectivity	1-1337482-0	RS (420-5401)	1	RS
	Cabo coaxial "fino"	RS	RG178B/U	RS (906-0626)	0,5 m?	RS
	Isolamento térmico	RS	Nomex tipo 410	RS (775-7469)	1 (lote de 5)	RS
	Folha de cobre	-	-	-	5 x 15 cm	-
Controlo Indução	O'Ring	viton	-	ID 14mm/CS 2mm/T 200°C	1	vedamais
	Sensor Hall	Honeywell	SS94A2D	Descontinuado (< 0,25 T)	1	-
	Fios ou Cabo (3 condutores)	-	Ø 0,5 mm	-	0,5 m	-
	D sub 9 contactos painel	MULTICOMP	MC000963	Farnell (2473042)	1	Farnell
Controlo Temp. / Circuito Ar	Resistência Ar	RS	400 W	RS (8607191)	1	RS
	Cabo termopar	RS	Tipo T	RS (827-6028)	1 m	RS
	Ficha termopar fêmea	RS	Tipo T / Painei	RS (455-9900)	2	RS
	Acessório bulkhead	SMC	KQ2E08-02	RS (771-4951)	1	RS
	Sensor fluxo	Gems	FS-926	RS (907-3773)	1	RS
	Bloco terminal 2 contactos (PCB)	CAMDENBOSS	CTB5202/2	Farnell (1717001)	2	Farnell
	Relé	Forward	FRM18NA-24 VDC	Robert Mauser (083-0147)	1	Robert Mauser
	Extensor roscado M/M	RS	hex long nipple Male	RS (499-3221)	1	RS
	Conector elbow push-in	RS	R 1/4 - 8mm	RS (299-4070)	2	RS
	Tubo nylon	legris	1025P08 02	Farnell (224-265)	1 m	Farnell
	Mini-fit 4 contactos macho	Molex	39-01-3043	RS (797-8963)	1	RS
	Mini-fit 4 contactos femea	Molex	39-01-2040	RS (484-1754)	1	RS
	Cabo (2 condutores)	-	Ø 1 mm (min.)	-	0,5 m	-
	Ficha 3 contactos circular painel	BINDER	09-0977-00-03	Farnell (1122372)	1	Farnell
	Fio isolado	-	Ø 0,5 mm	-	0,5 m	-
	Terminal Mini-fit macho	Molex	5558TL	Robert Mauser (011-0345)	2	Robert Mauser
	Terminal Mini-fit fêmea	Molex	5556TL	Robert Mauser (011-0341)	2	Robert Mauser
	Isolamento térmico	Aerogel	MSS02/059	RS (103-4078)	1	RS
Ventilação	Ventilador	ebmpapst	QG030-148/14	RS (771-9114)	1	RS
Sinalização	LED SMD	Kingbright	KA-3528MBS	Robert Mauser (017-1053)	6	Robert Mauser
	Fios ou Cabo (5 condutores)	-	Ø 0,5 mm	-	0,5 m	-
Pega	Lona	-	-	-	70 x 50 mm	-
	Fita dupla face	-	-	-	-	-
Magneto	Magneto	Oficel - Electrotecnia, Lda	-	-	1	OFICEL
Comum	Placa perfurada (PCB)	Roth Elektronik	RE520-HP	RS (206-5841)	1	RS
	Ficha 7 contactos circular painel	Neutrik	NC7MD-LX	RS (166-349)	1	RS
	Abraçadeira	Mikalor	W5	Mikalor (B3015804)	15	Imporseal
	Vara cerâmica	MACOR	Ø 35 x 100 mm	RS (225-5505)	1	RS
Fichas para cabos	D sub 9 contactos cabo	MULTICOMP	MC000970	Farnell (2473044)	1	Farnell
	Ficha termopar macho	RS	Tipo T / Cabo	RS (455-9922)	2	RS
	Ficha 3 contactos circular cabo	BINDER	99-0976-100-03	Farnell (1122365)	1	Farnell
	Ficha 7 contactos circular cabo	Neutrik	NC7FXX	RS (166-440)	1	RS



# ANEXO X

## Sugestão de sequência de montagem



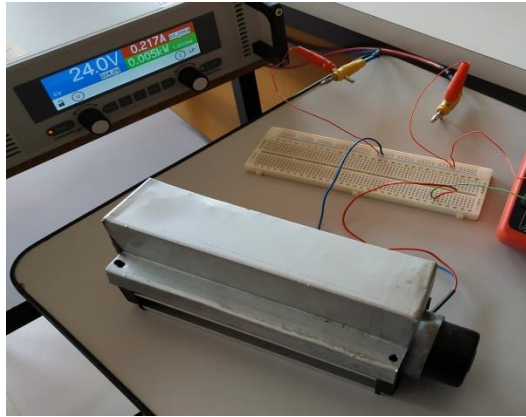




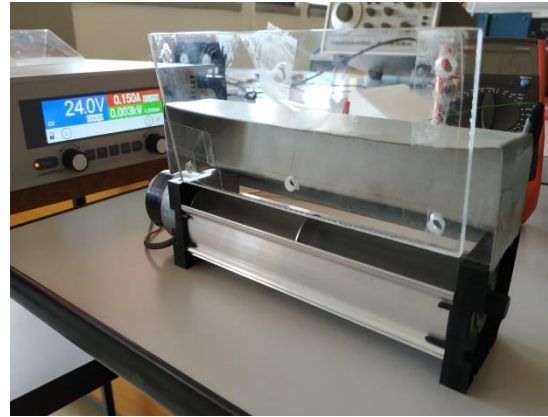
# ***ANEXO XI***

## **Testes ao ventilador**

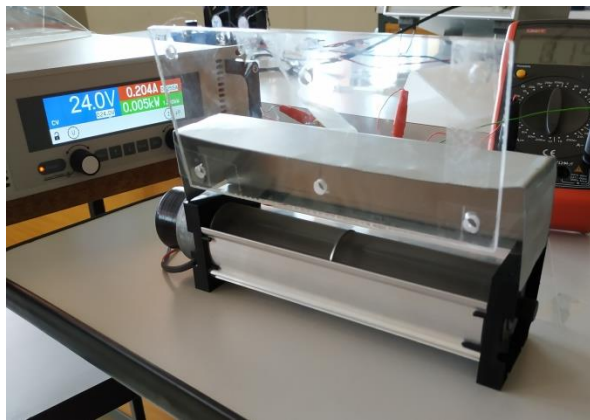
Neste anexo ilustram-se os ensaios feitos ao ventilador.



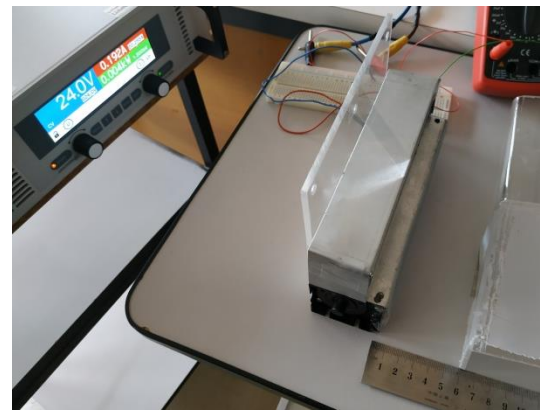
a) Com conduta.



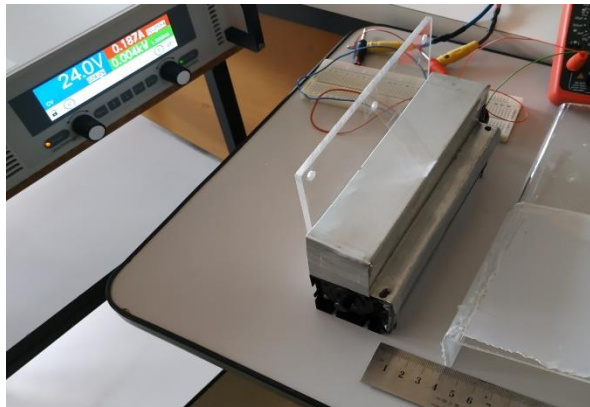
b) Com obstrução "maior" na entrada.



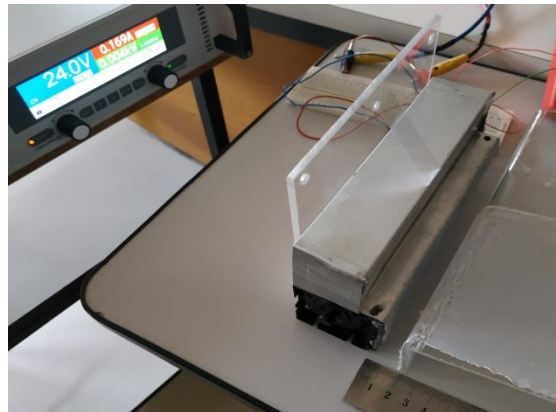
c) Com obstrução "menor" na entrada.



d) Com obstrução na saída a 6 cm.



e) Com obstrução na saída a 4 cm.



f) Com obstrução na saída a 2 cm.